



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**VERIFICACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL DE LAS ALTERNATIVAS
ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA VÍAS CON BAJOS
VOLÚMENES DE TRÁNSITO DEL INVIAS**

PRESENTADO POR:

DANIEL FERNANDO HERRERA CABREJO - 506954

JUAN DAVID MÉNDEZ SÁNCHEZ - 507080

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2021**

**VERIFICACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL DE LAS ALTERNATIVAS
ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA VÍAS CON BAJOS
VOLÚMENES DE TRÁNSITO DEL INVIAS**

PRESENTADO POR:

DANIEL FERNANDO HERRERA CABREJO - 506954
JUAN DAVID MÉNDEZ SÁNCHEZ - 507080

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DOCENTE ASESOR:

ING. CRISTHIAN ALEXANDER ROSALES RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2021**



Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

BOGOTÁ D.C.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los docentes que enriquecieron nuestro conocimiento y fueron de ayuda para elaborar este proyecto, así mismo las personas que nos brindaron información al respecto del tema, nuestro director de proyecto de grado Cristian Rosales por su apoyo y orientación y en especial a nuestros padres que fueron un pilar para nuestra carrera profesional.

DEDICATORIA

Dedicamos esta investigación a la ingeniería de Colombia, pensando en el beneficio y el impacto que pueda tener la consideración de los hallazgos expuestos.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
3.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	16
4.	OBJETIVOS	18
4.1	General.....	18
4.1	Específicos	18
5.	ESTADO DEL ARTE	19
6.	MARCO DE REFERENCIA	22
6.1	MARCO TEÓRICO.....	22
6.1.1	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	22
6.1.2	INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS)	22
6.1.3	MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO	22
6.1.4	MÉTODOS DE DISEÑO.....	23
6.1.4.1	AASHTO 93 – PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS	23
6.1.4.2	METODO RACIONAL.....	29
6.1.5	SOFTWARE	33
6.1.5.1	WinDEPAV 2.6.....	33
6.2	MARCO CONCEPTUAL.	35
6.2.1	Tránsito	35
6.2.2	Módulo resiliente	35
6.2.3	Coeficiente de Poisson (V)	36
6.2.4	Modelo de carga.....	36
6.2.5	Ahuellamiento.....	36
6.2.6	Fatiga	36
6.2.7	Esfuerzo	36
6.2.8	Deformación permanente	36
6.2.9	Esfuerzo a tracción.....	37
6.2.10	Deformación vertical.....	37
6.2.11	Deformación a tracción	37

7.	METODOLOGÍA.....	38
7.1.	FASE DE RECONOCIMIENTO	39
7.1.1	Tránsito	39
7.1.2	Clima	40
7.1.3	Estudio de la capacidad de soporte de la subrasante	40
7.1.4	Categoría de subrasante	41
7.1.5	Alternativas estructurales	42
7.1.5.1	Tratamientos superficiales:	43
7.1.5.3	Base granular - BG:	43
7.1.5.4	Sub base granular - SBG:.....	44
7.1.5.5	Suelo estabilizado con cemento Portland - BEC:.....	44
7.1.5.6	Mezcla densa en frio tipo 2 - MDF-2:	44
7.1.5.7	Suelo estabilizado con emulsión - BEE-3:	44
7.1.5.8	Mezcla densa en caliente tipo 2 - MDC-2:	44
7.1.5.9	Afirmado - AFR:	44
7.1.5.10	Capa subrasante - CSR:.....	45
7.1.5.11	Algoritmo de diseño del Método AASHTO-93.....	46
7.1.5.12	Confiabilidad	46
7.1.5.13	Coeficientes estructurales.....	47
7.2	FASE DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	47
7.2.1	Transito	48
7.2.2	Clima	48
7.2.3	Caracterización de los materiales	48
7.2.4	Subrasante (SBR)	49
7.2.5	Base granular (BG)	50
7.2.6	Sub Base granular (SBG).....	50
7.2.7	Base estabilizada con emulsión asfáltica (BEE-3) y base estabilizada con cemento portland (BEC)	50
7.2.8	Mezclas asfálticas (MDF Y MDC).....	51
7.2.9	Deformaciones y esfuerzos admisibles	53
7.2.10	Deformación a tracción	53
7.2.11	Deformación vertical.....	54
7.2.12	Esfuerzo a tracción.....	54

7.2.13	Principios de diseño del software	55
7.2.13.1	Modelo de carga.....	55
7.2.13.2	Volumen de vacíos.....	55
7.2.13.3	Porcentaje de asfalto.....	56
7.2.13.4	Índice de penetración	56
7.3	FASE DE MODELACIÓN DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES ..	57
8.	ALCANCES Y LIMITACIONES	61
9.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	62
10.	DISCUSIONES.....	72
11.	CONCLUSIONES.....	73
12.	RECOMENDACIONES	75
13.	ANEXOS	76
14.	BIBLIOGRAFÍA	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución red vial en Colombia	17
Figura 2. Nomograma AASHTO, coeficiente estructural a_1 , para mezcla de concreto asfáltico	24
Figura 3. Nomograma AASHTO, coeficiente estructural a_2 para base granular no tratada.....	25
Figura 4. Nomograma, coeficiente estructural a_3 para subbase granular no tratada.....	25
Figura 5. Interfaz WinDEPAV.....	34
Figura 6 Geometría del semieje de carga sobre el pavimento.....	35
Figura 7. Metodología	39
Figura 8 Tratamiento superficial doble.....	43
Figura 9. Coeficiente estructural $a_1=0.37$, para MDF-2	52
Figura 10. Coeficiente estructural $a_2=0.41$, para MDC-2.....	52
Figura 11. Interfaz WinDepav	58
Figura 12. Interfaz selección modelo para el cálculo a la fatiga.....	59
Figura 13. Interfaz selección modelo ahuellamiento	60
Figura 14. Interfaz Modelo de carga	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Serviabilidad final, P_f	26
Tabla 2. Calidad del drenaje.....	27
Tabla 3. Valores de, m_1 recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares.	27
Tabla 4. Niveles de confiabilidad R recomendados.....	28
Tabla 5. Error normal combinado, S_o	28
Tabla 6. Espesores mínimos de capas.....	29
Tabla 7. Niveles de p_f , recomendados	30
Tabla 8. Fractil μ	30
Tabla 9. Niveles de tránsito	40
Tabla 10. Categorías de subrasante	41
Tabla 11. Estructuras tipo sin afirmado existente	42
Tabla 12. Coeficientes estructurales a_1	47
Tabla 13. Caracterización de la subrasante	49
Tabla 14. Valores típicos módulos resiliente BEE Y BEC.....	51
Tabla 15. Coeficiente estructurales capas asfálticas asumidos	51
Tabla 16. Módulo resilientes MDF-2 y MDC-2	52
Tabla 17. Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).	56
Tabla 18. Requisitos mínimos de calidad del CA.....	57
Tabla 19. Valores admisibles de deformación y esfuerzo	62
Tabla 20. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S1.....	63
Tabla 21. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S2.....	64
Tabla 22. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S3.....	65
Tabla 23. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S4.....	66
Tabla 24. Resumen de fallas en las alternativas estructurales	67
Tabla 25. Coeficientes estructurales recomendados	68
Tabla 26. Módulo para capas granulares no tratadas.....	69
Tabla 27. Resultados de esfuerzos y deformaciones alternativa 5.....	69
Tabla 28. Resultados de esfuerzos y deformaciones propuesta alternativa 5.....	70
Tabla 29. Resultados de esfuerzos y deformaciones alternativa 6.....	71

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Modulo resiliente subrasante	23
Ecuación 2. Coeficiente estructural a_1	26
Ecuación 3. Coeficiente estructural a_2	26
Ecuación 4. Coeficiente estructural a_3	26
Ecuación 5. Espesor capa de concreto asphaltico.....	28
Ecuación 6. Espesor capa granular no trata de base	28
Ecuación 7. Espesor capa granular tratada subbase.....	28
Ecuación 8. Modelo AASHTO	29
Ecuación 9. Deformación a tracción	31
Ecuación 10. Deformación vertical para T1- T2.....	31
Ecuación 11. Deformación vertical para T3 y T5	31
Ecuación 12. Esfuerzo a tracción.....	31
Ecuación 13. Factor de seguridad	32
Ecuación 14. Desviación estándar.....	33
Ecuación 15. Modulo resiliente CBR > 10%	49
Ecuación 16. Modulo resiliente base	50
Ecuación 17. Modulo resiliente subbase.....	50
Ecuación 18. Desviación estándar.....	53
Ecuación 19. Coeficiente K_r	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S1	76
Anexo 2. Modelación alternativa 1, S1.....	76
Anexo 3. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S1	77
Anexo 4. Modelación alternativa 3, S1.....	77
Anexo 5. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S1	78
Anexo 6. Modelación alternativa 5, S1.....	78
Anexo 7. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S1	79
Anexo 8. Modelación alternativa 6, S1.....	79
Anexo 9. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S2	80
Anexo 10. Modelación alternativa 1, S2.....	80
Anexo 11. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S2	81
Anexo 12. Modelación alternativa 3, S2.....	81
Anexo 13. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S2	82
Anexo 14. Modelación alternativa 5, S2.....	82
Anexo 15. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S2	83
Anexo 16. Modelación alternativa 6, S2.....	83
Anexo 17. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S3	84
Anexo 18. Modelación alternativa 1, categoría S3.....	84
Anexo 19. Estructura pavimento alternativa 2, categoría S3	85
Anexo 20. Modelación alternativa 2, S3.....	85
Anexo 21. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S3	86
Anexo 22. Modelación alternativa 3, S3.....	86
Anexo 23. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S3	87
Anexo 24. Modelación alternativa 5, S3.....	87
Anexo 25. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S3	88
Anexo 26. Modelación alternativa 6, S3.....	88
Anexo 27. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S4	89
Anexo 28. Modelación alternativa 1, S4.....	89
Anexo 29. Estructura pavimento alternativa 2, categoría S4	90
Anexo 30. Modelación alternativa 2, S4.....	90
Anexo 31. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S4	91
Anexo 32. Modelación alternativa 3, S4.....	91
Anexo 33. Estructura pavimento alternativa 4, categoría S4	92
Anexo 34. Modelación alternativa 4, S4.....	92
Anexo 35. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S4	93
Anexo 36. Modelación alternativa 5, S4.....	93
Anexo 37. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S4	94
Anexo 38. Modelación alternativa 6, S4.....	94
Anexo 39. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S1	95
Anexo 40. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S1	96
Anexo 41. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S2	97
Anexo 42. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S2.....	98

Anexo 43. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S3.....	99
Anexo 44. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S3.....	100
Anexo 45. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S4.....	101
Anexo 46. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S4.....	102
Anexo 47. Modelación propuesta alternativa 6, S1	103
Anexo 48. Modelación propuesta alternativa 6, S2.....	104
Anexo 49. Modelación propuesta alternativa 6, S3.....	105
Anexo 50. Modelación propuesta alternativa 6, S4.....	106

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer las alternativas estructurales que presenta el manual de diseño para pavimentos flexibles de bajos volúmenes de tránsito del INVIAS (Instituto Nacional de Vías), siendo este el eje principal de estudio, en donde se analizará cada una de estas alternativas categorizadas por el tipo de subrasante correspondiente al número del CBR (California Bearing Ratio) que maneja por otro lado se explicaran de forma simple, los métodos más utilizados en el diseño de pavimentos como lo son el INVIAS que parte del método AASHTO 93 (American Association of State Highway and Transportation Officials), que se aplica actualmente en Colombia y el método racional, con el cual se pueden verificar los diseños que se emplean para los métodos empíricos, realizando la verificación en cuanto a las solicitudes que tiene cada pavimento para satisfacer los esfuerzos y deformaciones que se pueden presentar en cada una de las capas de la estructura del pavimento, de esta forma es posible conocer el comportamiento y analizar si estas capas pueden cumplir el periodo de diseño y no presentar daños prematuros que puedan reducir la vida útil del pavimento.

La forma en la que se verifican estas solicitudes será por medio del software WinDEPAV 2.6 el cual facilitará el análisis de cada una de las capas que componen la estructura de pavimento dependiendo de una serie de variables como lo son; la carga que soportará esta estructura, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales y el espesor de las capas, del mismo modo este programa tiene predefinidos una serie de modelos los cuales facilitaran la suposición de datos y ecuaciones empleadas para el cálculo de las deformaciones, daños por tensión, daño por compresión y adicionalmente el factor de daño para cada capa que expone el software.

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

En Colombia está normalizada la práctica por algunos ingenieros civiles de optar por la metodología de diseño del INVIAS para el diseño de estructuras de pavimento, las cuales tienen un análisis por medio de una metodología empírica, resultando el diseño de la estructura del pavimento. Tras la llegada del método racional, no se tienen estudios previos a disposición del público de este tipo de estructuras que nos presenta el manual del INVIAS para saber si realmente cumplen o no con los esfuerzos y deformaciones mínimos admisibles, ya que al no tener en cuenta que las capas que componen la estructura del pavimento tienen participación en las deformaciones de éste (Rondón y Reyes, 2015), pueden tener mayores o menores deformaciones en cada capa, esto puede ser causante de la reducción de la vida útil de los pavimentos ya que esta depende directamente de los criterios de diseño que pueden estar utilizándose de forma inadecuada (Dalla, P, 2016), en la cual se consideran las variables necesarias para emplear este método que son: el módulo de resiliente de la subrasante, el tránsito caracterizado en número de ejes equivalentes, las propiedades mecánicas de los materiales, la probabilidad de falla y los valores de deformación admisibles.

Por este motivo, es importante realizar una verificación o chequeo de este tipo de estructuras presentadas en el manual del INVIAS por medio del método racional o mecanicista, ya que este brinda la posibilidad conocer cómo será el comportamiento de cada capa de la estructura de pavimento y de esta forma determinar si realmente estas estructuras tipo cumplen con los criterios básicos de diseño en cuanto a esfuerzos y deformaciones, así mismo será posible saber si la estructura de pavimento presentará daños prematuros que incrementen los costos de mantenimiento, lo cual lleva a plantearse la siguiente pregunta, ¿Las estructuras tipo sin afirmado existente, que presenta el manual de diseño de pavimentos del INVIAS son en realidad la mejor alternativa estructural para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito?

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

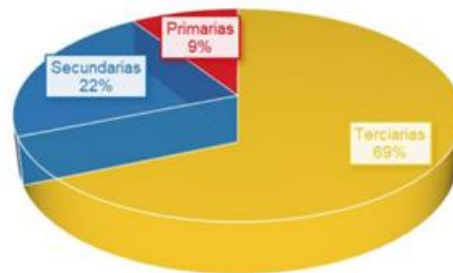
Desde las últimas décadas se ha implementado el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, este manual se ha cuestionado, ya que se basa en un método empírico como lo es el método AASHTO-93. Estos métodos presentan desventajas como lo es el suponer que las deformaciones permanentes ocurren principalmente en la subrasante; de manera que no es cierto debido a diversos estudios que se evidencian como se presenta el fenómeno de deformación permanente en materiales granulares empleados para conformar capas de base y subbase de estructuras de pavimento flexibles, que en pocas palabras demuestran que las capas granulares contribuyen en la acumulación de la deformación permanente en pavimentos flexibles (Rondón y Reyes, 2015).

En el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS facilita unas alternativas estructurales que definen para la construcción del pavimento, dicho manual nos sugiere adoptar un nivel de confiabilidad en el diseño del 70%; haciendo referencia en que hay un 30% de probabilidad de que el pavimento llegue a su falla antes que se acumule el tránsito de diseño y un setenta por ciento de probabilidad que la estructura después de haber acumulado el número de ejes previstos de 80KN llegara a su falla funcional.

En la investigación hecha por Ricardo González en el 2003 que estudia la confiabilidad en el diseño estructural de pavimentos, se basó principalmente en el Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C de ese año, pero se requiere hacer referencia más que todo es a la metodología empírica general en que se basaba dicho manual, aquí principalmente se analizó el impacto de la incertidumbre de los parámetros de diseño en la confiabilidad de las estructuras de pavimentos flexibles llegando a una conclusión, en este caso perteneciente a la estructura del pavimento, dice que la confiabilidad depende principalmente de la capa asfáltica de la base y como se presenta en las alternativas estructurales del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS; se consideran capas asfálticas delgadas o de baja rigidez y esto ocasiona que las capas granulares soportan el esfuerzo aplicado casi en su totalidad, y la magnitud de dichos esfuerzos pueden llegar a generar valores elevados de deformación permanente, dando certeza que si se analizan estas estructuras tipo del manual por el método racional, se podrían hallar alguna falla en el manual o se lograría una mejor estructura, evitando en muchos de manera más segura fallas por fatiga o ahuellamiento en los pavimentos con bajos volúmenes de tránsito (Bateman, Damien, 2018).

En Colombia 7 de cada 10 km vía pertenece a la red vial terciaria, evidenciando que en 2019 un 96% de dichas vías están en mal estado (Salcedo 2019), para el 2020 y 2021 el plan “Colombia rural” expone que la inversión del gobierno nacional rondara entre \$1 Billón para vías terciarias (Sánchez 2020). Se observó que en el diseño de pavimento flexible en la vía Melgar Tolima (Esneider y Ramírez, 2019) se usó el método INVIAS para vías de bajos volúmenes de tránsito, se resalta que luego del uso de dicho método se procedió a chequear por el método racional con el programa computacional WinDepav 2.6 para el cálculo de las mismas y se observó que estos espesores propuestos por la alternativa de diseño no cumplieron con los valores mínimos por los materiales, teniendo así que volver a simular hasta tener valores deseados y evitar una falla estructural en el pavimento y sabiendo que en la figura 1 se puede evidenciar que el noventa y un por ciento de la distribución de la red vial para Colombia para el año 2019 es de bajo nivel de tránsito y solo en las vía secundarias y esto hace un llamado al poder implementar un mejor método para las vías con bajos volúmenes de tránsito y garantizando un mejor desempeño estructural.

Figura 1. Distribución red vial en Colombia



Fuente: Distribución red vial en Colombia, Ministerio de transporte 2019.

El manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS (INVIAS, 2007), ofrece recomendaciones para el diseño de vías en Colombia; generalmente para el diseño de estos pavimentos se utiliza una metodología empírica. En Colombia las vías de bajos volúmenes de tránsito, presentan altos porcentajes de deterioro (Salcedo 2019); dando a entender que se puede estar incurriendo en errores de diseño, una posible causa puede ser la metodología empírica de diseño que se viene usando que no contempla las deformaciones permanentes en las capas que componen la estructura del pavimento (Rondón y Reyes, 2009). Esto podría conllevar a sobrecostos e inseguridad al transitar en las vías rurales nacionales, afectando por ejemplo al “Plan Colombia rural” (Sánchez, 2020). El manual del INVIAS presenta unas alternativas de diseño y se enfocará en estructuras donde no se pueda usar afirmado existente, para ello se hará un proceso de chequeo por la metodología racional analizando si estas alternativas estructurales cumplirán con su periodo de diseño de acuerdo a sus esfuerzos y deformaciones admisibles.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Verificar mediante la metodología racional, si las estructuras tipo para pavimentos nuevos propuestas por el manual de diseño para pavimentos de bajos volúmenes de tránsito del INVIAS cumplen con los esfuerzos y deformaciones admisibles.

4.1 Específicos

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las capas de pavimentos utilizadas por la metodología INVIAS.
- Realizar el chequeo estructural de las capas mediante la metodología racional.
- Comprobar los esfuerzos y deformaciones mediante la metodología racional aplicando el software de diseño WinDEPAV 2.6.

5. ESTADO DEL ARTE

A partir del experimento vial de AASHTO y las guías de diseño AASHTO (Corredor, 2008) El método AASHTO se da a partir de unos de unos experimentos realizados en el siglo XX que se dividieron en dos grandes etapas.

- **Primera etapa: Antes de la segunda guerra mundial**

Los métodos de diseño se fundamentaban en las características de los suelos de fundación y en la comparación del comportamiento de suelos similares que tenían una buena duración; en esta época se comenzó a estudiar el efecto que tiene el tráfico sobre el diseño, basado en en el conteo de vehículos clasificados como, pesados, medio o ligero y carga máxima por eje. Entre los métodos que se utilizaban en esta época, los más conocidos eran el “Índice de Grupo” y el “CBR”.

- **Segunda etapa: Después de la segunda guerra mundial y hasta 1988**

En esta etapa se estudiaron los efectos que tenía el pavimento debido a las cargas que actúan sobre él, cuantificando así los diversos factores que participan en el diseño y cómo influyen en el comportamiento, de este modo se cuantificó el “grado de falla” de la estructura, se analizan teóricamente los factores de diseño en función del comportamiento real ante el tráfico. En esta etapa fue de gran influencia los ensayos de carreteras a una escala real que han sido el fundamento de los métodos actuales.

Los más conocidos son:

- Carretera experimental de Maryland (USA)
- Carretera experimental WASHO (USA)
- Carretera experimental LARR (ALEMANIA)
- Experimento vial de la AASHTO (USA).

Luego de estos experimentos, con los resultados obtenidos, se desarrollaron “guías provisionales” en el año 1962, hasta el año 1972, que es cuando se pierde el calificativo de “provisionalidad” y se adopta bajo el título de “Guías para el diseño de Pavimentos” y es a partir de esta que se incorpora el “tránsito” como responsabilidad de la organización de administradores de carreteras.

Tras un estudio de muchos años y con la recolección de datos de los ensayos anteriores se determinó que “las guías de diseño de pavimentos AASHTO-72” cumplía con los objetivos básicos, en el periodo 1984-1985 el subcomité de diseño

de pavimentos junto con un grupo de ingenieros se dieron cuenta de que podían incorporar un modelo que fuera más satisfactorio en el diseño y a finales del año 1986 publican el nuevo “Manual de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO-86” que tras una revisión en el año 1993 se opta por desarrollar el Método AASHTO-93. (Corredor, 2008).

Este manual mantiene las ecuaciones de los pavimentos establecidas en el Experimento Vial de la AASHO en 1961, como los modelos básicos que deben ser empleados en el diseño de pavimentos, de igual manera se incorporaron diferentes áreas de diseño, como lo son:

- Factor de confiabilidad, el cual es fundamentado en un posible cambio del tráfico a lo largo del periodo de diseño que permite proyectar un análisis de riesgo para los diversos tipos de facilidades viales a proyectar.
- Módulo resiliente, el cual proporciona un procedimiento de laboratorio racional que corresponde al principio de la teoría elástica para la determinación de las propiedades de resistencia de los materiales.
- Establecimiento de guías para la construcción de sistemas de subdrenajes y modificaciones de diseño que permiten tomar en cuenta las ventajas que resulta tener un buen sistema de drenaje en los pavimentos.

A diferencia del método empírico como lo es el AASHTO 1993, el método racional o mecanicista tiene en cuenta el estado de esfuerzo y deformación que presentan las capas que conforman un pavimento. Para el desarrollo de este método, eventualmente son empleados software de diseño que facilitan el cálculo de los esfuerzos y deformaciones obtenidos con una serie de variables como lo son, la carga que soportará la estructura del pavimento, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales y el espesor de las capas. (Rondón y Reyes, 2015).

En Colombia cualquier entidad ya sea pública o privada que deseen realizar el diseño de un pavimento para una vía de bajos volúmenes de tránsito, debe tener en cuenta una serie de normas y manuales establecidos, los cuales serán la base fundamental para poder llevar a cabo este tipo de proyectos. El método más común que se ha utilizado durante los últimos años por los ingenieros civiles es el método del INVIAS, el cual desarrolló unos manuales para el diseño de pavimentos basado en el método estadounidense AASHTO (1993) mencionado anteriormente, pero este tiene en cuenta los cambios de tiempo de las condiciones de tránsito o del clima de la zona de estudio. (INVIAS, 1998).

Para tener una idea del panorama del estado de las vías que hay en Colombia, se remite a un artículo virtual, el cual nos expone que en Colombia existen 206.708

kilómetros de vía, de los cuales 142.284 son terciarias o de bajos volúmenes de tránsito. La mayor responsabilidad recae sobre los entes territoriales, pues les corresponde más del 65% es decir 110.419 kilómetros de vía están a su cargo, 18% (27.577 km) es responsabilidad del INVIAS, 9% (13.959 km) de los departamentos y 8% (12.251 km) hace parte de la red privada. (Salcedo, 2019)

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 MARCO TEÓRICO.

6.1.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Los pavimentos flexibles están compuestos por capas de diferentes materiales y diferentes espesores, las cuales deben soportar cargas que se transmiten por cada una de ellas, de modo que se pretende soportar la carga total en el conjunto de estas capas. El manual del INVIAS nos expone una serie de capas, con las cuales trabajan alternativas de estructuras para el diseño de pavimentos flexibles, en donde se presentarán más adelante en la fase de reconocimiento del INVIAS.

6.1.2 INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS)

Este Instituto tiene como objetivo el planteamiento de programas y estrategias para los proyectos de infraestructura no concesionada de la red vial Nacional de carreteras primarias, secundarias, terciarias, infraestructura fluvial, marítima y férrea, de acuerdo con los lineamientos dados por el Ministerio de Transporte. El INVIAS realiza junto con el Ministerio de Transporte el programa de los proyectos tendientes a la construcción, reconstrucción, mejoramiento y rehabilitación.

El INVIAS realiza junto con el Ministerio de Transporte el programa de los proyectos tendientes a la construcción, reconstrucción, mejoramiento y rehabilitación.

6.1.3 MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO

Este manual de diseño tiene como objetivo ser de utilidad para que los ingenieros puedan cumplir con la necesidad de generar economía en los municipios y departamentos de Colombia por medio de vías terciarias y secundarias que fortalezcan la red nacional, siendo el eje problemático, el estado deplorable de las vías de acceso en los pequeños municipios.

Para ello, el manual presenta recomendaciones en relación con el diseño de vías rurales, a partir de información básica de fácil acceso para las entidades que deseen realizar estos proyectos, no es una simple guía ya que cuenta con especificaciones requeridas para la construcción y el mantenimiento rutinario. Los parámetros de diseño que se encuentran en este manual se mostraran más adelante.

6.1.4 MÉTODOS DE DISEÑO

Generalmente para el diseño de un pavimento se usa la metodología empírica y más que todo para pavimentos de bajos volúmenes de tránsito, dicho método tiene como objetivo controlar principalmente la fatiga y el exceso de deformación permanente, presentados como mecanismo de degradación (Rondón y Reyes, 2015). Sus parámetros de diseño requeridos son: la subrasante que se tiene con base en el módulo resiliente, tránsito y adicionalmente se tiene en cuenta aparte de las propiedades mecánicas de los materiales, índice de servicialidad y las condiciones ambientales, climáticas y el drenaje.

A continuación, se presentarán de manera breve y resumida los métodos de diseño que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del presente trabajo.

6.1.4.1 AASHTO 93 – PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS

Se basa primordialmente en identificar un “número estructural (SN)” para el pavimento, que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural, el método se apoya en una ecuación que relaciona los coeficientes, con sus respectivos números estructurales, los cuales se calculan con ayuda de un software, (AASHTO 93) el cual requiere unos datos de entrada como son el número de ejes equivalentes, el rango de serviciabilidad, la confiabilidad y el módulo resiliente de la capa a analizar. (Monzalve, 2012).

Variables de diseño

1. **Subrasante:** Caracterizada a través del módulo resiliente utilizando la ecuación 1.

Ecuación 1. Modulo resiliente subrasante

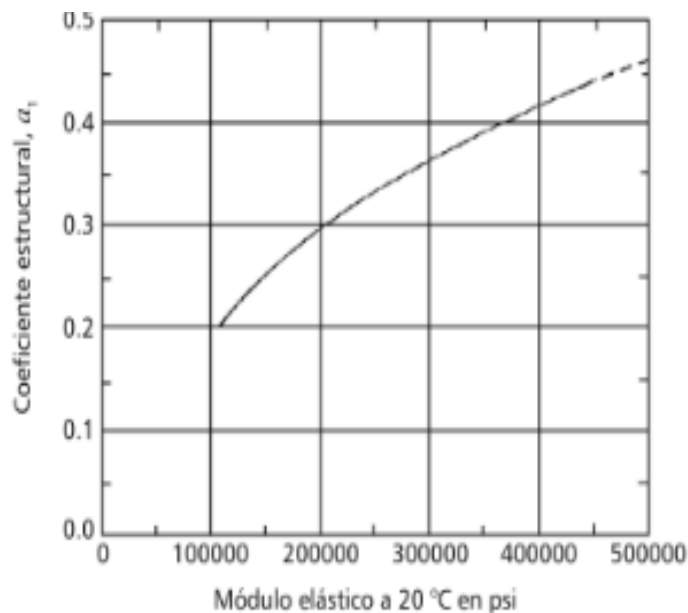
$$Mr = 2555 \times (CBR)^{0.64}$$

En donde:

CBR= Californian Bearing Ratio.

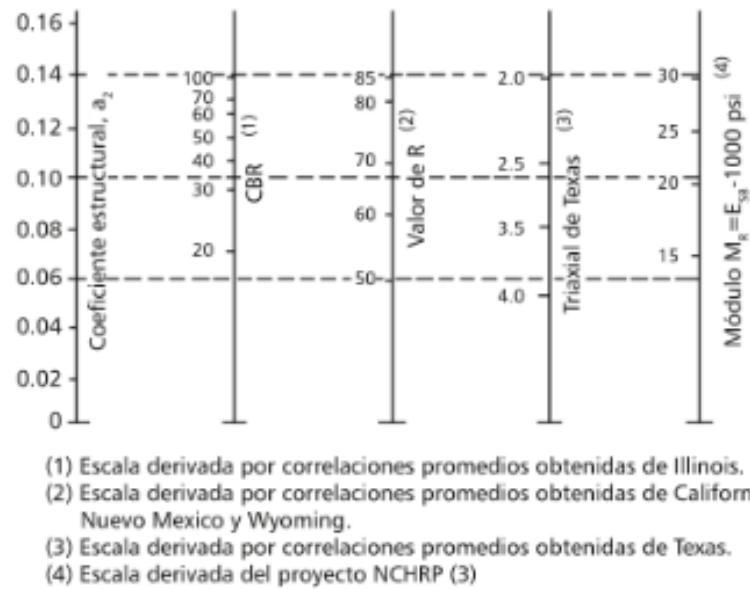
- 2. Transito:** Se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circularán en el carril y periodo de diseño.
- 3. Propiedades mecánicas de los materiales:** Estas propiedades son caracterizadas por el módulo resiliente de las distintas capas que componen la estructura de pavimento, para el diseño y dimensionamiento del espesor de estas capas tiene parámetros traducidos a coeficientes estructurales que pueden ser determinados por medio de las ilustraciones (2,3 y 4) o de las ecuaciones (1,2 y 3) que aplican solamente para pavimentos flexibles. Estos coeficientes miden la capacidad relativa de una unidad de espesor de una determinada capa para funcionar como componente estructural del pavimento. Cuando el subíndice es $i=1$, el coeficiente estructural corresponde a la capa de concreto asfáltico; $i=2$, para la capa granular no tratada de base; e $i=3$ para la capa granular no tratada subbase (Rondón y Reyes, 2015).

Figura 2. Nomograma AASHTO, coeficiente estructural a_1 , para mezcla de concreto asfáltico



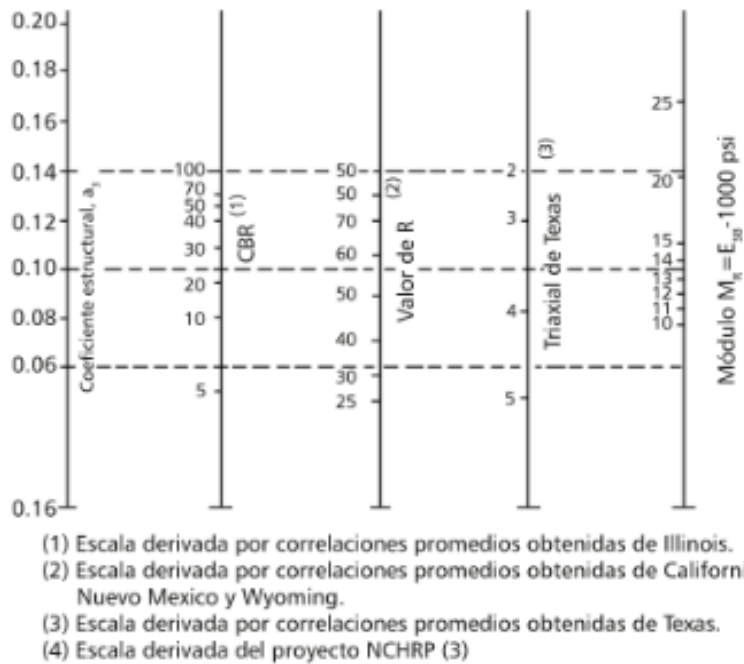
Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Figura 3. Nomograma AASHTO, coeficiente estructural a_2 para base granular no tratada.



Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Figura 4. Nomograma, coeficiente estructural a_3 para subbase granular no tratada.



Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Estos coeficientes estructurales pueden ser determinados por medio de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2. Coeficiente estructural a_1

$$a_1 = 0.184 * \ln(E_1) - 1.9547$$

Ecuación 3. Coeficiente estructural a_2

$$a_2 = 0.249 * \log(E_2) - 0.977$$

Ecuación 4. Coeficiente estructural a_3

$$a_3 = 0.227 * \log(E_3) - 0.839$$

En donde E_1, E_2, E_3 , son los módulos resilientes en PSI, que conforman la capa asfáltica, la base granular y sub base granular no tratada respectivamente.

4. **Índice de serviciabilidad:** Este índice se compone por el estado inicial y final de serviciabilidad del pavimento que se diseñara, este estado se evalúa de forma cuantitativa entre 0 y 5, donde 5 se asume que el pavimento se encuentra en perfecto estado de serviciabilidad. De esta forma es posible proyectar cual será la vida útil del pavimento sin que este tenga deterioro. En la tabla (1) AASHTO-93 presenta unos valores recomendados para determinar la serviciabilidad final.

Tabla 1. Serviciabilidad final, P_f

Tipo de vía	Serviciabilidad final, P_f
Autopista	2.5 – 3.0
Carreteras	2.0 – 2.5
Zonas industriales	
Pavimento urbano principal	1.5 – 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 – 2.0

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

5. **Condiciones ambientales y drenaje:** Estas condiciones son tomadas de acuerdo a las características que tienen las capas de base y subbase granular, como material, calidad del drenaje y porcentaje de humedad próxima a la saturación para así determinar cuál va ser la calidad de drenaje

que tendrá la estructura de pavimento según la tabla 2 y según la calidad hacer uso de la tabla 3.

Tabla 2. Calidad del drenaje

Calidad del drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy malo	El agua no evacúa

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Tabla 3. Valores de, m_1 recomendados para corregir los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares.

Características del drenaje	Porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación			
	Menos del 1%	1 – 5%	5 – 25%	Más de 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy malo	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

- 6. Confiabilidad (R):** Esta variable tiene en cuenta el grado de incertidumbre que presentara la estructura de pavimento a partir de la estimación de las variables de diseño mencionadas anteriormente.

Este parámetro es contrario a la probabilidad de falla, puesto que $R=100\%$, indica que el diseñador utilizó una probabilidad de falla de 0% y por ende el espesor de las capas del pavimento alcanzaran su mayor valor debido a que el factor de seguridad es el más alto. A partir de un valor $R= 50\%$ es que el método de diseño introduce un factor de seguridad. La tabla (4) presenta los valores de R recomendados por el método de diseño.

Tabla 4. Niveles de confiabilidad R recomendados

Tipo de carretera	Nivel de confiabilidad R [%]	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85.0 – 99.9	80.0 – 99.9
Arterias principales	80.0 – 99.0	75.0 – 95.0

Tipo de carretera	Nivel de confiabilidad R [%]	
	Urbana	Interurbana
Colectoras	80.0 – 95.0	75.0 – 95.0
Locales	50.0 – 80.0	50.0 – 80.0

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Según el método, para el diseño de pavimentos se debe determinar el error normal combinado (S_o), el cual tiene en cuenta el error o desviación del diseño y variación de todas las variables mencionadas anteriormente. Estos valores se obtienen por medio de la tabla (5)

Tabla 5. Error normal combinado, S_o

Proyecto de pavimento	S_o	
	Flexible	Rígido
	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Construcción nueva	0.45	0.35
Sobrecapas	0.50	0.40

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

En cuanto a los espesores de cada una de las capas, el método propone las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5. Espesor capa de concreto asfáltico

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1}$$

Ecuación 6. Espesor capa granular no trata de base

$$h_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 * m_2}$$

Ecuación 7. Espesor capa granular tratada subbase

$$h_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 * m_3}$$

Donde el subíndice es $i=1$, el coeficiente estructural corresponde a la capa de concreto asfáltico; $i=2$, para la capa granular no tratada de base; e $i=3$ para la capa granular no tratada subbase

SN son los números estructurales de capa, determinados a través del módulo resiliente por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 8. Modelo AASHTO

$$\log(W_{18}) = Z_r \times S_0 + 9.36 \times \log(SN_i + 1) - 0.20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN_i + 1)^{5.19}}} \right] + 2.32 \times \log(M_r) - 8.07$$

Para estructuras de pavimento flexible, el método recomienda tener en cuenta los espesores mínimos que debe presentar cada capa que compone el pavimento.

Tabla 6. Espesores mínimos de capas.

$W_{18} (10^6)$	Espesores mínimos en pulgadas	
	Capa asfáltica	Base granular
<0.05	TSD	4.0
0.05-0.15	2.0	4.0
0.15-0.50	2.5	4.0
0.50-2.00	3.0	6.0
2.00-7.00	3.5	6.0
>7.00	4.0	6.0

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

6.1.4.2 METODO RACIONAL

En el método de diseño racional; también llamado mecanicista. Es un método de diseño analítico en el cual, a diferencia de los métodos empíricos, este tiene en cuenta el estado de deformaciones y esfuerzos que presentan las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento, que en pocas palabras si tienen en cuenta las diferentes capas en la participación de deformaciones permanentes. En el procedimiento de método racional, se tiene la obligación de que el diseñador considera cada uno de los factores que afectan el diseño del pavimento (Huang, 2004). Sus parámetros requeridos son: el módulo resiliente (M_r), el coeficiente de Poisson, las condiciones de carga, el tránsito y el número de capas de la estructura. En el uso de este método generalmente se hace uso software, siendo alguno de los

más famosos como: DEPAV (Universidad del Cauca), ELSYM5(Chevron Oil), BISAR (Shell), WinDEPAV (Vásquez,2018), entre otros. (Rondón y Reyes, 2015).

Las variables necesarias para emplear este método de diseño son:

1. **Subrasante:** Caracterizada por el módulo resiliente.
2. **Transito:** Caracterizado a través del número de ejes equivalentes de 13 toneladas que circulan en un carril y periodo de diseño.
3. **Propiedades mecánicas de los materiales:** Los parámetros mecánicos con los cuales se caracterizan los materiales son el módulo resiliente y la relación de Poisson (ν) con el fin de facilitar los cálculos por medio del uso de programas que calculen los esfuerzos y deformaciones suponiendo que el comportamiento de los materiales es elástico lineal.
4. **Probabilidad de falla p_f :** Tiene en cuenta el grado de incertidumbre que presenta cada una de las variables de diseño mencionadas, introduciendo un factor de seguridad al diseño, el método introduce este factor cuando el valor de p_f es inferior a 50%, los valores recomendados se presentan en la tabla (7) y los traduce a valores de fractil de la ley normal centrada μ en la tabla (8).

Tabla 7. Niveles de p_f , recomendados

Tránsito	Probabilidad de falla para flexible, p_f [%]	Probabilidad de falla para rígido, p_f [%]
T1	50	50
T2	25	25
T3	12	15
T4	5	10
T5	2	2

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Tabla 8. Fractil μ

p_f [%]	50	30	25	20	15	10	7	5	2	1
u	0.0	-0.52	-0.674	-0.841	-1.037	-1.282	-1.476	-1.645	-2.054	-2.327

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

5. Valores de deformaciones admisibles: Como ya se mencionó anteriormente, el método racional tiene en cuenta como el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas de una estructura de pavimento influyen en el comportamiento de este. Estas deformaciones que eventualmente se calculan por medio de softwares, en donde se les introduce la presión de contacto, propiedades mecánicas de los materiales y el espesor y el espesor de las capas de pavimento con el fin de obtener los resultados de esfuerzos y deformaciones.

Una vez calculados estos esfuerzos y deformaciones, es importante realizar la comparación con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada. Para pavimentos flexibles los mecanismos de daño que se deben controlar son la fatiga y el ahuellamiento.

El fenómeno de fatiga se controla a través de la deformación a tracción (ϵ_t) máxima que puede experimentar la capa ligada (capa asfáltica) en la fibra interior y el ahuellamiento en la subrasante a través de la deformación vertical (ϵ_z) (Rondón y Reyes, 2015).

Para el cálculo de estas deformaciones admisibles se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 9. Deformación a tracción

$$\epsilon_t = \epsilon_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b * k_c * k_s * k_t * k_r$$

Ecuación 10. Deformación vertical para T1- T2

$$\epsilon_z = 0.016 (NE)^{-0.222}, \quad \text{para } T1 - T2$$

Ecuación 11. Deformación vertical para T3 y T4

$$\epsilon_z = 0.012 (NE)^{-0.222}, \quad \text{para } T3 - T4$$

Ecuación 12. Esfuerzo a tracción

$$\sigma_t = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b * k_c * k_d * k_r * k_s$$

En donde:

- ϵ_t : Deformación a tracción máxima que puede experimentar la capa asfáltica en la fibra interior y el ahuellamiento en la subrasante a través de la deformación vertical ϵ_z
- ϵ_6 y σ_6 : Amplitud de deformación y esfuerzo necesarios para que el material falle a 10^6 ciclos de carga.
- b : Pendiente de la ley de fatiga
- K_c : Coeficiente que tiene en cuenta el comportamiento que experimenta el material en laboratorio es diferente al de in situ.
- K_s : Coeficiente que tiene en cuenta la resistencia a la fatiga de la capa ligada
- K_r : Factor de seguridad

Para capas de rodadura y base asfáltica puede suponerse como 1.1 y 1.3 respectivamente.

Para materiales estabilizados con cementantes hidráulicos, K_c oscila entre 1.4 y 1.5, este coeficiente tiene en cuenta que la resistencia a la fatiga de la capa ligada depende de la rigidez y la capacidad portante, es decir, entre menos rígida sea la capa que soporte la capa ligada, mayor deformación a tracción se presentara en la fibra interior y por lo tanto tendra agrietarse más fácil por fatiga de carga.

Para las capas de soporte que tienen poca rigidez, la capa ligada subyacente experimentara mayor deformación a tracción en la fibra interior y por lo tanto tendra agrietarse más fácilmente por fatiga. Para ello $K_s = 1$ cuando la rigidez de la plataforma sobre la que se apoya la capa ligada es superior a 120 MPa.

$K_t = 1$, cuando la temperatura del ensayo de fatiga de laboratorio y la del campo son iguales.

$K_d = 1$, para materiales estabilizados con cementos hidráulicos.

Para determinar el factor de seguridad (K_r) se puede utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Factor de seguridad

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

En donde:

- K_r : Factor de seguridad
- μ : Es el fractil
- b : Pendiente de la ley de la fatiga del material
- δ : Desviación estándar

La desviación estándar puede ser calculada a través de la ecuación:

Ecuación 14. Desviación estándar

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + S_H^2 * \left(\frac{0.02}{b}\right)^2}$$

En donde:

- δ : Desviación estándar
- S_N : Desviación estándar de la ley de la fatiga del material
- S_H : Desviación estándar de los espesores del material colocados in situ.
- b : Pendiente de la ley de la fatiga del material

El método recomienda $b = -0.2$, S_N para bases asfálticas, capas de rodadura, granulares estabilizados con cemento hidráulico, suelo cemento y concreto hidráulico son 0.3, 0.25, 1.0, 0.8 y 1.0 respectivamente. En el caso de S_H los valores típicos recomendados para bases asfálticas, capas de rodadura, granulares estabilizados con cemento hidráulico, suelo cemento hidráulico y concreto hidráulico son 2.5cm, 1.0cm, 2.5cm, 2.5cm y 1cm, respectivamente.

6.1.5 SOFTWARE

6.1.5.1 WinDEPAV 2.6

Este software es una herramienta de apoyo o ayuda para el análisis y diseño de pavimentos con metodología racional, se va a usar este programa ya que se diseñó como una plataforma de fácil y preciso manejo para estudiantes, investigadores y diseñadores. Este software fue desarrollado con apoyo y en relación por el programa DEPAV del instituto de Vías de la Universidad del Cauca en Colombia, por los ingenieros Alfonso Murgueitio Valencia, Carlos Alberto Benavides y Efraín de Jesús Solano Fajardo para la investigación nacional de pavimentos de Colombia (INPACO) de 1993. El autor de este programa es el ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela, profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales (Varela, 2018).

Para poder iniciar con el programa y del mismo modo con el diseño de la estructura se muestra la interfaz en la ilustración 5 (Geotecnia aplicada, 2020). Hay que dar unos indicadores que son: Nombre del proyecto, número de capas y su espesor, parámetros elásticos de cada capa, el comportamiento por fatiga, ahuellamiento y deformación permanente, el daño a compresión que está asociado a la deformación permanente.

Figura 5. Interfaz WinDEPAV

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vázquez Varela, M.Sc.

Archivo DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas)

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahueamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	C ^k k ₁ ¹ (1/E) ^{k₃}	Daño por tensión	N esperado	Daño por compresión	N esperado
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Carga en la superficie del pavimento

Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm)

Distancia entre ruedas (cm)

Presión de contacto (kgf/cm²)

¡IMPORTANTE! Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.

Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.

Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.

Luis Ricardo Vázquez Varela, 2018.

Fuente: Geotecnia Aplicada

Por último, se debe seleccionar el modelo de carga (Ilustración 6) que actuarán el pavimento, se seleccionarán tres parámetros que son: El radio del área de contacto, distancia entre ruedas y presión de contacto. En el programa también tiene modelos predeterminados, en este caso para Colombia se usará el modelo MOPT (Ministerio de obras públicas y transporte en Colombia) UNICAUCA. De acuerdo a los resultados se tiene en cuenta se tiene en cuenta los valores de deformación a tracción, deformación vertical, esfuerzos a tracción y un plus que es el factor de daño tanto para tensión como para compresión, ya que si es mayor a 1 quiere decir que no cumple y la estructura fallará antes del periodo de diseño requerido.

Figura 6 Geometría del semieje de carga sobre el pavimento

El diagrama superior ilustra tres modelos de carga: un eje de dos ruedas con una carga P en el eje central; un eje de dos ruedas con cargas $P/4$ en cada una y una distancia D entre los centros; y una carga distribuida q sobre un área A .

Modelo	P(ton.)	A (cm)	D (cm)	q (kgf/cm²)
<input checked="" type="radio"/> MOPT UNICAUCA	8.200	10.8	32.4	5.594
<input type="radio"/> ASPHALT INSTITUTE	8.164	11.5	34.5	4.912
<input type="radio"/> SHELL OIL	8.156	10.5	31.5	5.887
<input type="radio"/> GUÍA FRANCESA 1994	13.26	12.5	37.5	6.752
<input type="radio"/> RUEDA SENCILLA	8.200	15.0	0.00	5.800
<input type="radio"/> Definido por el usuario	<input type="text" value="8.200"/>	<input type="text" value="10.8"/>	<input type="text" value="32.4"/>	<input type="text" value="5.594"/>

Para una rueda sencilla emplee $D = 0.0$ cm.
El programa calcula la presión de contacto.

Fuente: Geotecnia Aplicada

6.2 MARCO CONCEPTUAL.

6.2.1 Tránsito

El tránsito representa la carga sobre el pavimento flexible en este caso de bajo volumen de tránsito, este se representa como número de ejes equivalentes donde generalmente en Colombia y usado por el manual de bajos volúmenes de tránsito del Invias, basándose en el Asshto-93 es de 80KN que circula en un carril y durante el periodo de diseño. (Rondón y Reyes, 2015).

6.2.2 Módulo resiliente

Este módulo es un parámetro muy importante para la aplicación de métodos racionales, ya que este parámetro en pocas palabras indica que tan rígido es un material bajo carga cíclica. Varias veces por cuestiones prácticas se correlaciona con el valor del CBR. (Rondón y Reyes, 2015).

6.2.3 Coeficiente de Poisson (ν)

Es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo. (González, 2018).

6.2.4 Modelo de carga

Es un modelo que está definido por 3 parámetros para el diseño de pavimentos los cuales son: el radio del área de contacto que depende de la carga de las llantas y la presión de inflado, distancia entre las ruedas en el eje y la presión de contacto entre el eje y el pavimento. (Geotecnia aplicada, 2020).

6.2.5 Ahuellamiento

Es el deterioro gradual de la superficie y se manifiesta como una ondulación bajo las bandas de circulación vehicular. (Caro, Coral y Hormaza, 2003).

6.2.6 Fatiga

Es el transcurso permanente, progresivo y localizado a los cambios de las condiciones del material expuesto a cargas repetidas dando como resultado la aparición de fisuras o grietas que llevan a la rotura total del pavimento. (Alfaro, Flores y Martínez, 2016).

6.2.7 Esfuerzo

Es la fuerza que hace un elemento de la estructura para no ser deformado por las cargas que actúan sobre él. (Federación de enseñanza, Andalucía, 2011).

6.2.8 Deformación permanente

Cuando a un material granular se inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total (ϵ_T) que se genera es recuperada (deformación resiliente, ϵ_r).

Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente (ϵ_p). (Rondón y Reyes, 2015).

6.2.9 Esfuerzo a tracción

Es la relación de una presión ejercida sobre un área determinada que se puede presentar en la parte inferior de una capa de concreto, si dicho esfuerzo es muy grande se podría presentar falla a fatiga. (Yang H. Huang, 2004)

6.2.10 Deformación vertical

Una carga de un neumático produce un esfuerzo vertical (compresión). Esta respuesta produce compresión en los materiales del pavimento que si es permanente puede observarse como surcos o rodaderas plásticas en la superficie del pavimento. (Yang H. Huang, 2004)

6.2.11 Deformación a tracción

Es la deformación presentada en la parte inferior de la capa asfáltica, que, si dicha deformación es muy grande de acuerdo a la estructura del pavimento, puede ocasionar una falla estructural por fatiga. (F.P. Gonçalves, 2009).

7. METODOLOGÍA

Fase de reconocimiento

Se conocerá la forma de cómo Invias pudo adaptar la metodología de la Asshto-93 para el diseño de pavimentos flexibles con bajo volumen de tránsito y cómo se adaptó para la determinación de sus variables como: la categorización de la subrasante, el tránsito y las condiciones meteorológicas.

Fase de recolección y análisis de datos

Se va a usar y constatar los parámetros de diseño propuestos por el manual para la modelación de las estructuras, analizar y determinar las variables que son requeridas por el software WinDEPAV 2.6 como: las propiedades elásticas de los materiales, los espesores de las capas, las ecuaciones de daño para tensión y compresión y el modelo de carga a usar. Esto será de acuerdo a cada alternativa propuesta por invias para capas sin uso de afirmado existente (6) y dependiendo la resistencia de la subrasante.

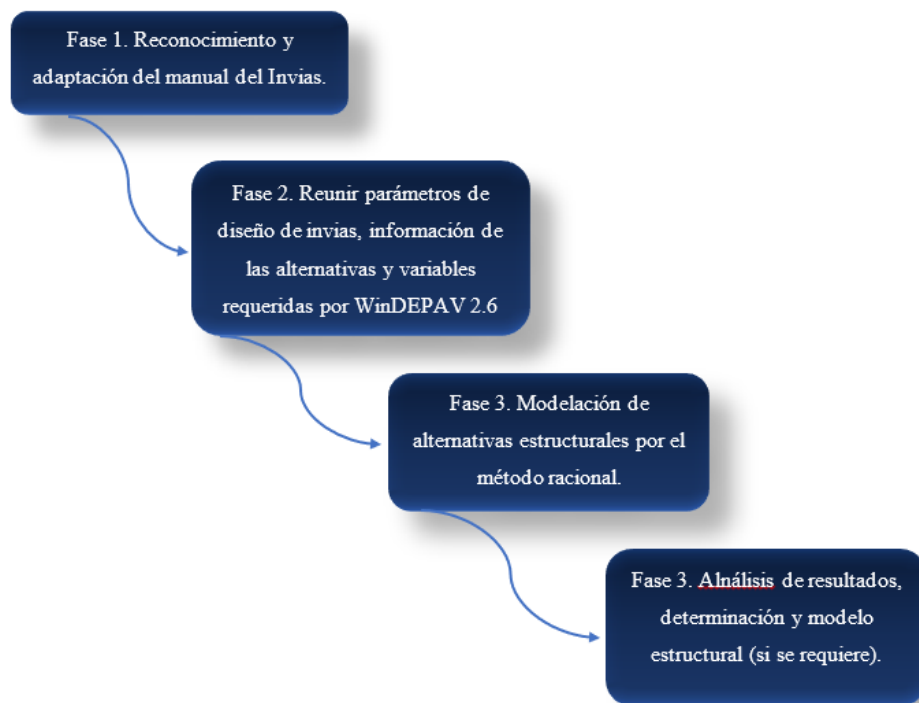
Fase de modelación de alternativas estructurales

Se iniciará el proceso de modelación por el método racional en apoyo con el programa WinDEPAV 2.6, haciendo en total 19 modelaciones, iniciando desde las alternativas aplicadas para la subrasante S1 y así con cada categoría hasta las alternativas aplicadas para S4 (Tabla 11).

Fase de análisis y comparación de los resultados

A partir de cada modelación realizada se verificará sus deformaciones y esfuerzos, con de las ecuaciones de deformaciones admisibles presentadas por el método racional; se sabrá si en verdad es una alternativa confiable y en caso tal de que no lo sea, se realizaran modelaciones con nuevas propuestas verificando si hay probablemente deficiencia en las propiedades mecánicas propuestas por el manual o en los espesores mínimos para cada alternativa.

Figura 7. Metodología



Fuente: Elaboración propia

7.1. FASE DE RECONOCIMIENTO

Para esta fase fue necesario realizar un estudio al detalle del manual INVIAS, de esta forma conocer cuáles son las variables que requiere el manual para su diseño, ya que este adopta criterios de diseño del método AASHTO 93, en los cuales pueden variar los parámetros de cada variable para Colombia. A continuación, se presentarán brevemente las variables de diseño que expone el manual y que serán utilizadas para la fase de modelación.

7.1.1 Tránsito

Esta variable, al igual que el método AASHTO 93, es considerada a partir del número de repeticiones de carga que generan los ejes de 8.2kN en el carril de diseño. El manual clasifica esta variable en dos niveles como se muestra en la tabla 9, en función del número de ejes previstos durante el periodo del carril de diseño.

Tabla 9. Niveles de transito

Nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes de 80 kN durante el período de diseño en el carril de diseño
T1	< 150.000
T2	150.000 - 500.000

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

Es importante resaltar que el manual proporciona una guía en la cual explica cómo caracterizar esta variable, a partir del tránsito promedio diario (TPD) que se tiene con los datos de la serie histórica, o que en su defecto puede ser determinarlo por medio de conteos si no se cuenta con una serie histórica. En este caso y para el desarrollo en general de nuestro trabajo, no será necesario caracterizar el tránsito por medio de TPD, sino más bien se escogerá un numero de ejes equivalentes de 80 kN a partir de la tabla (9).

7.1.2 Clima

Las condiciones ambientales en general tienen un efecto muy significativo en los pavimentos, en especial los factores de precipitación y temperatura ya que estos tienen un grado de impacto importante frente al comportamiento de las estructuras de pavimento. Otros factores como susceptibilidad de los materiales a la humedad, el drenaje de las capas asfálticas, la infiltración de la estructura, definen la manera en la cual el pavimento reaccionará a la aplicación de las condiciones ambientales externas.

Por lo anterior, los diseñadores de pavimento deben considerar el estudio de las condiciones climáticas de la zona en donde se tiene previsto realizar el proyecto. Para ello, es necesario realizar mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológico, el manual recomienda apoyarse en la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y en los criterios del IDEAM por medio de las estaciones meteorológicas que ofrecen.

7.1.3 Estudio de la capacidad de soporte de la subrasante

Para esta variable el manual nos presenta extensamente la forma en la cual se caracteriza una subrasante, desde su composición en materiales y tipo de suelo

hasta los ensayos de laboratorios con los cuales pueden ser determinadas estas características, por motivos de cálculos, obviaremos todas aquellas características que presenta una subrasante y nos enfocaremos solamente en la manera en la cual se determina el módulo resiliente para las diferentes categorías de subrasante a partir del CBR que tiene cada alternativa estructural a estudiar.

Una vez se establece el valor del CBR se puede calcular el módulo resiliente utilizando la correlación propuesta por la AASHTO indicada a continuación. (Ecuación 1).

$$M_r = 2555 \times (CBR)^{0.64}$$

En donde:

- M_r : Valor del modulo resiliente en libras por pulgada cuadrada (PSI).
- CBR: Porcentaje del CBR adoptado.

7.1.4 Categoría de subrasante

El manual establece los tipos de estructura de pavimentos más compatibles con la capacidad de soporte de la subrasante, definiéndolas en las categorías mostradas en la tabla (10)

Tabla 10. Categorías de subrasante

CATEGORÍA	CBR (%)	COMPORTAMIENTO COMO SUBRASANTE
S1	$CBR \leq 3$	Malo
S2	$3 < CBR \leq 5$	Regular
S3	$5 < CBR \leq 10$	Bueno
S4	$CBR > 10$	Muy Bueno

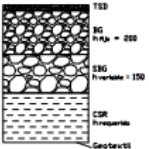
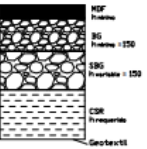
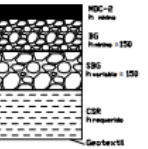
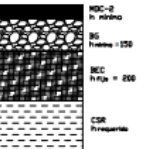
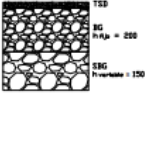
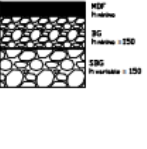
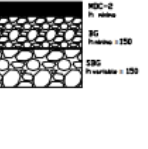
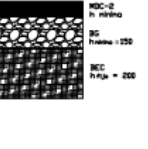
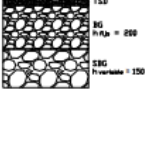
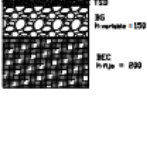
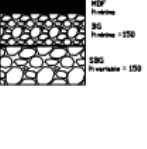
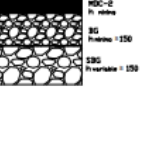
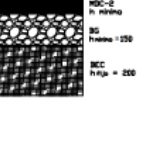
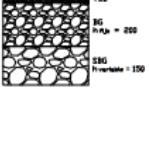
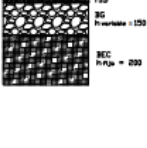
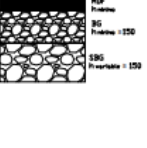

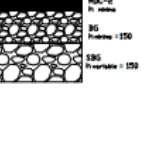
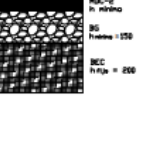
Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

7.1.5 Alternativas estructurales

El manual del INVIAS presenta 6 alternativas estructurales, en donde no existe o no es posible utilizar el afirmado existente y están clasificadas por la categoría de la subrasante en base del número de CBR, estas son:

- Alternativa 1: TSD + BG + SBG
- Alternativa 2: TSD + BG + BEC
- Alternativa 3: MDF-2 + BG + SBG
- Alternativa 4: MDF-2 + BEE-3 + SBG (eventualmente)
- Alternativa 5: MDC-2 + BG + SBG
- Alternativa 6: MDC-2 + BG + BEC

Tabla 11. Estructuras tipo sin afirmado existente

CATEGORÍA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO					
	1	2	3	4	5	6
S1 $3 \leq \text{CBR}$		N.A.		N.A.		
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$		N.A.		N.A.		
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$				N.A.		
S4 $\text{CBR} > 10$						

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

A continuación, se explicará brevemente cada una de las capas del pavimento que son mostradas en las diferentes alternativas de estructuras.

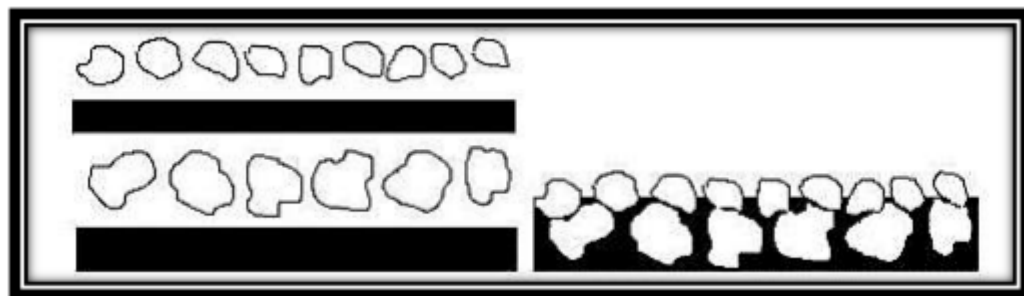
7.1.5.1 Tratamientos superficiales:

Los tratamientos superficiales se definen como un riego de ligante, eventualmente de emulsión asfáltica de rompimiento rápido convencional o modificada, seguido de agregados pétreos. Estos tratamientos no tienen capacidad estructural pero sí funcional, ya que provee una superficie estable y antideslizante en cualquier tipo de clima, elimina la emisión de polvo y protege las capas subyacentes de la infiltración de agua. (Hernández, Rosales y Trigueros, 2016)

7.1.5.2 Tratamiento superficial doble - TSD:

Son dos riegos alternos y uniformemente distribuidos de ligante bituminoso y agregado sobre una superficie acondicionada previamente. (Hernández, Rosales y Trigueros, 2016)

Figura 8 Tratamiento superficial doble



Fuente: Tratamiento superficial doble, Josue Hernandez, Karla Rosales y Wilfredo Trigueros. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO. San salvador: Universidad del salvador, 2016.

7.1.5.3 Base granular - BG:

La base granular está formada por una combinación de piedra o grava, arena y suelo en su estado natural, con trituración parcial para dar lugar a una capa integrante del pavimento. (Zambrano y Tejeda, 2019).

7.1.5.4 Sub base granular - SBG:

Se denomina subbase granular a la capa granular localizada entre la subrasante y la base granular en los pavimentos asfálticos o la que sirve de soporte a los pavimentos de concreto hidráulico. (INVIAS Artículo 320-07).

7.1.5.5 Suelo estabilizado con cemento Portland - BEC:

Es una capa base, constituida por material adicionado totalmente o resultante de la escarificación de la capa superficial existente, o una mezcla de ambos, estabilizados con cemento Portland (INVIAS Artículo 341-07).

7.1.5.6 Mezcla densa en frio tipo 2 - MDF-2:

La mezcla densa será la capa definida como una mezcla asfáltica densa, preparada en frío, compuesta por agregados finos y un ligante asfáltico diluido en agua llamadas emulsiones en diferentes concentraciones. (INVIAS, Artículo 440-07).

7.1.5.7 Suelo estabilizado con emulsión - BEE-3:

El suelo estabilizado con emulsión asfáltica consiste en 3 ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsivo, en donde la emulsión puede contener otros aditivos como estabilizadores, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia o agentes de control de rotura con el fin de proporcionar propiedades de impermeabilización y adhesión para aumentar la resistencia al corte y flexión (Rondón y Reyes, 2015).

7.1.5.8 Mezcla densa en caliente tipo 2 - MDC-2:

Se define como una mezcla asfáltica o bituminosa en caliente a la combinación de áridos, incluido el polvo mineral con un ligante que determinan las propiedades físicas de la mezcla. (Zúñiga C, 2015).

7.1.5.9 Afirmado - AFR:

Es una capa compactada de material granular natural o procesado con gradación específica que soporta directamente las cargas y esfuerzos del tránsito, este debe

poseer una cantidad apropiada de material fino cohesivo que permita mantener aglutinada las partidas. (Sandoval, C.H (2010).

7.1.5.10 Capa subrasante - CSR:

Es el suelo que sirve como cimentación para todo el paquete estructural de un pavimento, tiene como función recibir y resistir las cargas del tránsito emitidas por las diferentes capas de pavimento y de esta forma transmitir en forma adecuada a las capas inferiores (Rondón y Reyes, 2015).

Respecto a los espesores que acompañan estas estructuras y se recomiendan en el manual son:

- **Capas de rodadura:** Para garantizar la protección de la subyacente, tal como lo obliga el método AASHTO-93, se establecen espesores mínimos en función de la categoría del tránsito tal como se evidencia en la tabla (9.)

Tabla 9. Niveles de tránsito

Categoría de tráfico	Rango de ejes de 80 kN en el carril de diseño	h_{min} (mm)
T1	< 150.000	50
T2	150.000 - 500.000	75

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

- **Capas de base granular:** Este valor debe garantizar la protección de la capa subyacente en donde el espesor mínimo recomendado por conveniencia constructiva es de 150mm. Para las capas estabilizadas con cemento portland o emulsión asfáltica se establecen espesores fijos de (200mm o 150mm).
- **Capas de subbase granular:** Para este caso está asociado a la alternativa 4 en la que la estructura de pavimento involucra una mezcla densa en frío (MDF-2) y una capa de suelo estabilizado con emulsión de espesor fijo de 150mm, para ello la sub base granular tendrá un espesor mínimo de 150mm subyacente a la capa estabilizada con emulsión asfáltica
- **Capa subrasante:** Estas capas tienen comprenden un espesor que no es posible conocer con anterioridad a la construcción, ya que el espesor de la

capa será aquel que permita obtener las condiciones de compactación exigidas por las especificaciones del INV. Es importante mencionar que cuando esta capa presenta una capacidad de soporte muy bajo, con un valor de CBR menor a tres por ciento (<3%), el diseño debe involucrar la utilización de un geotextil y de una capa subrasante.

7.1.5.11 Algoritmo de diseño del Método AASHTO-93

La ecuación básica utilizada en el dimensionamiento de las estructuras propuestas por el método AASHTO, tiene en cuenta condiciones de tránsito, confiabilidad, serviciabilidad y resistencia de la subrasante.

El algoritmo utilizado es:

$$\text{Log } N_{80\text{kN}} = Z_r \times S_o + 9.36 \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right] + 2.32 \text{Log } M_r - 8.07$$

En donde:

- $N_{80\text{kN}}$: Numero acumulado de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- Z_r, S_o : Parámetros de confiabilidad en el diseño
- SN : Numero estructural
- ΔPSI : Perdida de serviciabilidad, $\Delta PSI = 2.2$
- M_r : Modulo resiliente de la subrasante en PSI

7.1.5.12 Confiabilidad

Considerando que este manual va dirigido a vías de bajo tránsito, se sugiere adoptar un nivel de confiabilidad del setenta por ciento (70%). Lo cual indica que existe un setenta por ciento de probabilidad que el pavimento llegue a su falla funcional después de haber acumulado el número de ejes de 80 kN, del mismo modo existirá un treinta por ciento (30%) de que el pavimento alcance su falla antes de que se acumule el tránsito de diseño (INVIAS, 2007).

7.1.5.13 Coeficientes estructurales

El manual nos presenta la tabla 12 en la cual se han asumido los coeficientes estructurales a_i para las diferentes capas que componen la estructura del pavimento.

Tabla 12. Coeficientes estructurales a_1

Tipo de capa		Clasificación climática por temperatura	a_i
Descripción de la Capa	Nomenclatura		
Mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2	MDC-2	Frío	0.44
		Templado	0.41
		Cálido	0.37
Mezcla asfáltica densa en frío tipo 2	MDF-2	Frío	0.40
		Templado	0.37
		Cálido	0.34
Suelo estabilizado con emulsión asfáltica	BEE-3	Todas las categorías	0.14
Suelo estabilizado con cemento Portland	BEC	Todas las categorías	0.14
Base granular	BG	Todas las categorías	0.14
Subbase granular	SBG	Todas las categorías	0.12
Afirmado que cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-1	Todas las categorías	0.08
Afirmado que no cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-2	Todas las categorías	0.06

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

7.2 FASE DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Siguiendo la metodología propuesta, se procederá a identificar cuáles son los parámetros que serán establecidos para cada variable en el desarrollo del trabajo a partir del manual del invias.

7.2.1 Transito

Para esta variable se tomó el transito como el caso más crítico que propone el manual según la tabla (9), para vías de bajos volúmenes de tránsito, en este caso el nivel del tránsito con el cual trabajaremos será T2, en donde el número de ejes equivalentes de 80 kN previstos durante el periodo de diseño se encuentra entre 150.000 - 500.000, siendo 500.000 nuestro valor del tránsito con el cual vamos a diseñar.

Tabla 9. Niveles de transito

Categoría de tráfico	Rango de ejes de 80 kN en el carril de diseño	h_{min} (mm)
T1	< 150.000	50
T2	150.000 - 500.000	75

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

7.2.2 Clima

En este caso, la precipitación no la tendremos en cuenta, por lo que el parámetro con el cual vamos a trabajar esta variable será solamente con la temperatura, puesto que esta es la solicitada en el software de diseño.

Para temas de practicidad, asumimos una temperatura promedio de 20°C ya que esta nos facilita el uso de los nomogramas planteados por el método AASHTO para el cálculo del módulo resiliente de las capas asfálticas en base al coeficiente estructural.

7.2.3 Caracterización de los materiales

Como se mencionó anteriormente en los métodos de diseño, para caracterizar las propiedades de los materiales es necesario conocer el módulo resiliente de cada capa que compone la estructura del pavimento y la relación de poisson. Para ello se determinaron estas propiedades por medio de los parámetros del manual de invias y los nomogramas que presenta el método AASHTO para el módulo resiliente de la capa de rodadura.

7.2.4 Subrasante (SBR)

En primer lugar, se realiza la caracterización del módulo resiliente de la subrasante para cada categoría según el valor de CBR que propone el manual en las categorías S1, S2, S3 Y S4 de las alternativas estructurales, en donde tomamos un valor de CBR para cada categoría que corresponde a 3%, 4%, 8% y 12% respectivamente

$$Mr = 2555 \times (CBR)^{0.64}$$

Por medio de esta ecuación se calcula el módulo resiliente de la subrasante (ecuación 1). para cada categoría excepto la 4, puesto que no se puede usar la correlación propuesta por el manual ya que solamente puede ser utilizada para valores de CBR < 10%.

Es importante resaltar que la categoría S1 por ser un suelo de subrasante malo según invias se requiere de una estabilización del suelo de la subrasante con geotextil tejidos o no tejidos. Se asumirá un mejoramiento a un CBR bueno según invias que oscila entre 5-10% escogiendo un valor de mejoramiento de 5%, este valor también esta como requisito mínimo para la adaptación de suelo de mejoramiento o terraplén, recomendado con el fin de no tener fallos estructurales a corto plazo presentarse en el proceso constructivo.

Tabla 13. Caracterización de la subrasante

Categoría	Modulo resiliente (PSI)	Modulo resiliente $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
S1 (CBR = 3%)	5161.17	362.86
S1 (CBR mejorado = 5%)	71570.1	503.19
S2 (CBR = 4%)	6204.53	436.22
S3 (CBR = 8%)	9668.71	670.77

Fuente: Elaboración propia

Se sugiere que se realice la correlación propuesta por Ayres (1997) que se puede utilizar para CBR > 10%. (Rondón y Reyes, 2015)

Ecuación 15. Modulo resiliente CBR > 10%

$$Mr = 21 (CBR)^{0.65}$$

Categoría	Modulo resiliente (MPa)	Modulo resiliente $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$
S4 (CBR = 12%)	105.60	1076.82

7.2.5 Base granular (BG)

Para determinar el módulo resiliente de la base granular se hace uso de una ecuación empírica (Rondón y Reyes, 2015) en función del módulo resiliente de la sub base granular y el espesor de la capa base. Esta ecuación se obtiene asumiendo que las capas granulares son elásticas y utilizando medidas de deflexión in situ.

Ecuación 16. Modulo resiliente base

$$E_{base} = E_i[8.05\log h + 0.84\log E_i - 2.1 \log E_i \log h - 2.21]$$

En donde:

- Ebase: Modulo resiliente de la base granular
- Ei: Modulo resiliente de la capa subyacente
- h: Espesor de la capa granular donde se requiere el modulo

7.2.6 Sub Base granular (SBG)

Al igual que la base granular, se utiliza una ecuación empírica, pero en este caso está en función del módulo resiliente de la subrasante.

Ecuación 17. Modulo resiliente subbase

$$E_{subb} = E_{subr}[5.35\log h + 0.62\log E_{subr} - 1.56 \log E_{subr} \log h - 1.13]$$

En donde:

- Esubb: Modulo resiliente de la sub base granular
- Esubr: Modulo resiliente de la subrasante
- h: Espesor de la capa donde se requiere el modulo

7.2.7 Base estabilizada con emulsión asfáltica (BEE-3) y base estabilizada con cemento portland (BEC)

Fue necesario investigar bibliografías con las cuales podamos apoyarnos en la determinación del módulo resiliente para estas bases, por lo que se encontró en el libro Modulo 7: Materiales para base y sub base granular, del ingeniero Fernando

Sánchez Sabogal; algunos valores típicos del módulo elástico los cuales se presentan en la tabla 14.

Tabla. Valores típicos módulos resiliente BEE Y BEC

Material	Rango (Kg/cm²)	Típico (Kg/cm²)
Base estabilizada con emulsión asfáltica	5000-36000	35190
Base estabilizada con cemento portland	350000-70000	50000

Fuente: Elaboración propia

7.2.8 Mezclas asfálticas (MDF Y MDC)

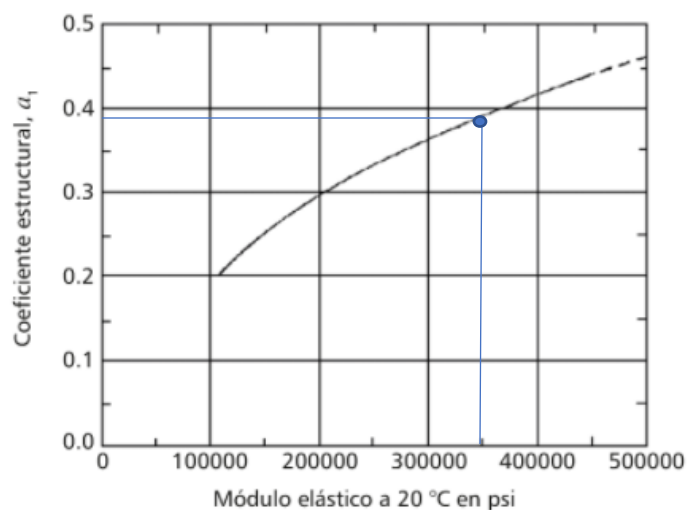
Para determinar las propiedades mecánicas de las capas asfálticas nos soportamos en los parámetros que nos da el manual de invias, por lo que a partir de la tabla 2, que nos brindan coeficientes estructurales recomendados para cada capa, tomamos los correspondientes de mezcla densa en frio y mezcla densa en caliente para un clima templado, a partir de estos coeficientes hacemos uso de los nomogramas del método AASHTO 93 y determinamos el módulo resiliente.

Tabla 14. Coeficiente estructurales capas asfálticas asumidos

Tipo de capa	Nomenclatura	Coeficiente estructural (a_i)
Mezcla asfáltica densa en frio tipo 2	MDF-2	0.37
Mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2	MDC-2	0.41

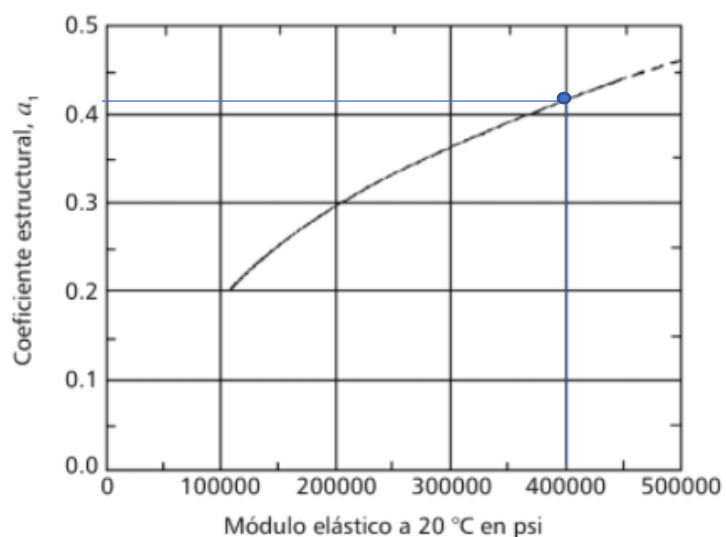
Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Coeficiente estructural $a_1=0.37$, para MDF-2



Fuente: Adaptado de Reyes y Rondón

Figura 10. Coeficiente estructural $a_2=0.41$, para MDC-2



Fuente: Adaptado de Reyes y Rondón

Tabla 15. Modulo resilientes MDF-2 y MDC-2

Tipo de capa	Modulo resiliente (PSI)	Modulo resiliente $\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$
MDF-2	350000	24607.43
MDC-2	400000	28122.78

Fuente: Elaboración propia

7.2.9 Deformaciones y esfuerzos admisibles

Como fue mencionado anteriormente, para determinar las deformaciones y esfuerzos admisibles se utilizarán las ecuaciones planteadas por el método racional (Rondón y Reyes 2015), de tal forma que, a partir de estas, se compararán con las deformaciones que nos arroja el software de diseño.

Para ello, se asumirán los valores típicos recomendados en el método para determinar la deformación a tracción de las capas asfálticas y la base estabilizada con emulsión asfáltica, del mismo modo se determinarán los esfuerzos a tracción de la base estabilizada con cemento portland.

7.2.10 Deformación a tracción

Para las capas asfálticas MDC y MDF, los coeficientes serán los mismos, por lo que $K_c = 1.1$, $K_s = 1.0$, $b = -0.2$, $\epsilon_6 = 0.0001$, $SN = 0.25$, $SH = 1$, $K_t = 1$ y $\mu = 0$, según los valores recomendados por el método y $NE = 500.000$ el cual fue el tránsito que elegimos para el diseño. Una vez han sido seleccionados los valores de los coeficientes y el número de ejes equivalentes, hallamos el k_r a partir de la desviación estándar.

Ecuación 18. Desviación estándar

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + S_H^2 \left(\frac{0.02}{b} \right)^2}$$
$$\delta = \sqrt{0.25^2 + 1^2 \left(\frac{0.02}{-0.02} \right)^2} = 0.269$$

Ecuación 19. Coeficiente K_r

$$k_r = 10^{-\mu b \delta}$$
$$k_r = 10^{-0 * -0.2 * 0.269} = 1$$

Una vez calculamos el K_r , es posible hacer uso de la ecuación 9, para determinar la deformación a tracción de la capa asfáltica.

$$\epsilon_t = \epsilon_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b * k_c * k_s * k_t * k_r$$

$$\varepsilon_t = 0.0001 * \left(\frac{500000}{10^6}\right)^{-0.2} * 1.1 * 1 * 1 * 1 = 0.000126 = 126.356 \text{ microstain}$$

Para la base estabilizada con emulsión asfáltica, los coeficientes son diferentes tal y como lo indica el método, por lo que ahora, $K_c = 1.3$, $K_s = 1.0$, $b = -0.2$, $\varepsilon_6 = 0.00008$, $SN = 0.3$, $SH = 2.5$, $K_t = 1$, y $\mu = 0$, del mismo modo se calcula la desviación estándar para poder determinar el K_r y hallar la deformación que presenta este tipo de bases.

$$\delta = \sqrt{0.3^2 + 2.5^2 \left(\frac{0.02}{-0.2}\right)^2} = 0.390$$

$$k_r = 10^{-\mu b \delta}$$

$$k_r = 10^{-0 * -0.2 * 0.390} = 1$$

$$\varepsilon_t = 0.0008 * \left(\frac{500000}{10^6}\right)^{-0.2} * 1.3 * 1 * 1 * 1 = 0.000119 = 119.464 \text{ microstain}$$

7.2.11 Deformación vertical

Esta deformación solamente se presenta en la subrasante y es calculada como se especifica en el método racional (Ecuación 10), a partir del número de ejes equivalentes ($NE = 500000$).

$$\varepsilon_z = 0.016 * (NE)^{0.222}$$

$$\varepsilon_z = 0.016 * (500000)^{0.222} = 0.00086 = 868.857 \text{ microstain}$$

7.2.12 Esfuerzo a tracción

Para este esfuerzo, al igual que las deformaciones es necesario utilizar los coeficientes recomendados por el método para la base estabilizada con cemento portland, con los cuales podremos calcular el esfuerzo a tracción. Para ello $K_c = 1.4$, $K_s = 0.666$, $K_d = 1$, $b = -0.07$, $\sigma_6 = 1.37$, $SN = 1$, $SH = 2.5$, y $\mu = 0$.

$$\delta = \sqrt{1^2 + 2.5^2 \left(\frac{0.02}{-0.07}\right)^2} = 1.220$$

$$k_r = 10^{-\mu b \delta}$$

$$k_r = 10^{-0*-0.2*1.220} = 1$$

$$\sigma_t = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b * k_c * k_d * k_r * k_s$$

$$\sigma_t = 1.37 \left(\frac{500000}{10^6} \right)^b * 1.4 * 1 * 1 * 0.666 = 1.345 = 13.700 \text{ microstain}$$

7.2.13 Principios de diseño del software

El pavimento se modela como un sistema multicapa elástica lineal, en el cual los materiales de cada capa se caracterizan por el módulo de elasticidad (módulo dinámico en mezclas asfálticas y módulo resiliente en suelos y materiales no ligados) y la relación de Poisson. El tránsito se expresa como repeticiones de ejes sencillos de 80 kN que aplican la carga a través de ruedas dobles.

7.2.13.1 Modelo de carga

Para propósitos de análisis, el modelo de carga que utilizaremos será el propuesto por el ministerio de obras públicas, en donde el eje tiene 8.2Ton, el radio del area de contacto es de 10.8cm, distancia entre ruedas de 32.4cm lo que corresponde a una presión de inflado de 5.59 kgf/cm².

7.2.13.2 Volumen de vacíos

El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

Tabla 16. Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).

Características		Norma de ensayo INV.	MDC, MSC, MGC			MAM
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima [N]		E-748	5000	7500	9000	15000
Flujo [mm]*		E-748	2-4	2-4	2-3.5	2-3
Estabilidad/Flujo [kN/mm]		E-748	2-4	3-5	3-6	-
Vacíos con aire (Va) [%]	Rodadura	E-736, 799	3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia		4-8	4-8	4-7	4-6
	Base		-	5-8	5-8	4-6
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Mezclas 38 mm	E-799	≥ 13	≥ 13	≥ 13	-
	Mezclas 25 mm		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 19 mm		≥ 15	≥ 15	≥ 15	-
	Mezclas 10 mm		≥ 16	≥ 16	≥ 16	-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%] para rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75

7.2.13.3 Porcentaje de asfalto

Según el ensayo Marshall, de la INVE-148-13, se especifica que, para determinar el porcentaje de asfalto, es necesario la implementación de ensayos de laboratorio, para un cemento asfáltico 60-70 se analizan entre 4 - 6% de asfalto por lo que nosotros tomaremos 6% para propósitos de análisis.

7.2.13.4 Índice de penetración

El índice de penetración que se utilizará para capas asfálticas en caliente está entre -1.2 a 0.6, para CA 60-70 (tabla 18) como ligante de mezclas en caliente utilizado por lo general en zonas con temperaturas medias anuales promedios inferiores a 24°C, por lo que lo asumimos como 0.

Tabla 17. Requisitos mínimos de calidad del CA

Ensayo	Método	Unidad	CA 40-50	CA 60-70	CA 80-100
Ensayos sobre el asfalto original (sin someter a procesos de envejecimiento)					
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	INV. E-706, ASTM D-5	0.1 mm	40-50	60-70	80-100
Punto de ablandamiento	INV. E-712, ASTM D-36-95	°C	52 - 58	48 - 54	45 - 52
Índice de penetración	INV. E-724, NLT 181	-	-1.2 a +0.6	-1.2 a +0.6	-1.2 a +0.6
Viscosidad absoluta (60 °C)	INV. E-716, ASTM D-4402	P	2000 mín.	1500 mín.	1000 mín.
Ductilidad (25 °C, 5cm/min)	INV. E-702, ASTM D-113	cm	80 mín.	100 mín.	100 mín.
Solubilidad en tricloroetileno	INV. E-713, ASTM D-2042	%	99 mín.	99 mín.	99 mín.
Contenido de agua	INV. E-704, ASTM D-95	%	0.2 máx.	0.2 máx.	0.2 máx.
Punto de inflamación	INV. E-709, ASTM D-92	°C	240 mín.	230 mín.	230 mín.
Contenido de parafinas	INV. E-718, UNE-EN-12606	%	3 máx.	3 máx.	3 máx.

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

7.3 FASE DE MODELACIÓN DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

Para poder iniciar con la modelación a través del software es necesario en primer lugar, dar una descripción del proyecto pedida por el programa, ya que si no se le coloca el programa no correrá. Luego el número de capas que tendrá la estructura, la subrasante cuenta como capa y la máxima cantidad de capas es de 6. Se muestra la interfaz del programa WinDEPAV 2.6 en la ilustración 11 (Geotecnia aplicada, 2020), en esta interfaz se ponen los parámetros elásticos de cada una de las capas; es decir el módulo de resiliente en kg/cm² y el coeficiente de Poisson. También se colocará el espesor de cada una de las capas y se asumirá que hay liga en cada una de las capas.

Figura 11. Interfaz WinDepav

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vázquez Varela, M.Sc.

Archivo DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas)

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión	Daño por compresión				
					$C*k1*(1/E)^{k3}$	$k2$	N esperado	$k4$	$k5$	N esperado
1			¿E?							
2			¿E?							
3			¿E?							
4			¿E?							
5			¿E?							
6			¿E?							

Carga en la superficie del pavimento

Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm)

Distancia entre ruedas (cm)

Presión de contacto (kgf/cm²)

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.

Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.

Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.

Luis Ricardo Vázquez Varela, 2018.

Fuente: Adaptado de WinDepav 2.6

Aparte de definir los parámetros elásticos del pavimento, también es necesario definir el comportamiento por fatiga, ahuellamiento y deformación permanente. En la capa asfáltica se evaluará el caso de daño por tensión que está asociado al agrietamiento por fatiga, al seleccionar el signo de interrogación, el programa abrirá otra ventana donde introducimos las variables con las cuales calcularemos el coeficiente K1 del programa las cuales son el índice de penetración, volumen de vacíos en aire (%) y el volumen de bitumen o porcentaje de asfalto (%), para luego escoger el modelo con el cual deseamos hallar el número de ciclos admisible que soporta nuestra estructura de pavimento.

Daño por tensión

$C*k1*(1/E)^{k3}$ $k2$? N esperado

Figura 12. Interfaz selección modelo para el cálculo a la fatiga

Asistente para la asignación de funciones de comportamiento

Capa

1

Copiar en la estructura

Cancelar

Las ecuaciones y los coeficientes propuestos han sido publicados en diferentes referencias. Sin embargo, es indispensable que el usuario caracterice sus materiales particulares para un adecuado diseño.

Agrietamiento por tracción repetida en la parte inferior de las capas cementadas

$$N_f = C * k_1 * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{k_2} * \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3}$$

Nf: Número de repeticiones de carga para la falla.
C: Coeficiente de ajuste laboratorio vs. campo.
et: Deformación horizontal de tracción en la capa.
E: Módulo de la capa (kg./cm²).
k1 a k3: Coeficientes empíricos de regresión.

Modelo	C	k1	k2	k3	Material
<input checked="" type="radio"/> Nottingham	1.00	8.8903E-13	4.90196	0.000	HMA
<input type="radio"/> CRR	1.00	4.8561E-14	4.76190	0.000	HMA
<input type="radio"/> MnROAD	1.00	2.8300E-06	3.14800	0.000	HMA
<input type="radio"/> Asphalt Institute (1982)	18.4		3.29100	0.854	HMA
<input type="radio"/> MEPDG (2004)	1.00		3.94920	1.281	HMA
<input type="radio"/> Shell Oil (MEPDG 2004)	1.00		5.00000	1.400	HMA
<input type="radio"/> AUSTROADS (1987)	1.00	1.2275E-34	18.0000	6.960	CTB
<input type="radio"/> QUEENSLAND (1988)	1.00	6.6124E-26	12.0000	3.580	CTB

HMA: Mezcla asfáltica en caliente. CTB: Base tratada con cemento.

☐ USUARIO

1.00

8.8903E-13

4.90196

0.000

Módulo de la capa (kg./cm²)

Variables adicionales para calcular k1

Índice de penetración del asfalto, IP
 0

Volumen de vacíos de aire, Va (%)
 5.0

Volumen de bitumen, Vb (%)
 6.0

Espesor total de las capas asfálticas, hCA (cm)

Cálculo de k1

Asphalt Institute (1982)


MEPDG (2004)

Shell Oil (MEPDG 2004)

Fuente: Adaptado de WinDepav 2.6

El otro daño a evaluar es el daño por compresión, este daño está asociado al daño por deformación vertical y se aplica para el resto de capas de la estructura del pavimento. Para determinar la ley que hallará el número de ejes admisible para el criterio de daño por compresión, al seleccionar la casilla con el signo de interrogación se abrirá una nueva ventana (ilustración 13) y ahí podremos escoger el modelo con el cual deseamos hallar el ahuellamiento por compresión repetida.

Daño por compresión

	k4	k5		N esperado
<input type="checkbox"/>				
<input checked="" type="checkbox"/>				
<input checked="" type="checkbox"/>			?	
<input checked="" type="checkbox"/>			?	
<input checked="" type="checkbox"/>			?	
<input checked="" type="checkbox"/>			?	

A red arrow points from the first checked row to the second checked row.

Figura 13. Interfaz selección modelo ahuellamiento

Asistente para la asignación de funciones de comportamiento

Capa

Las ecuaciones y los coeficientes propuestos han sido publicados en diferentes referencias. Sin embargo, es indispensable que el usuario caracterice sus materiales particulares para un adecuado diseño.

Ahuellamiento por compresión repetida en la parte superior de la fundación o de los materiales no cementados

$$N_d = k_4 * \left(\frac{1}{\epsilon_z} \right)^{k_5}$$

Nd: Número de repeticiones de carga para la falla.
 ez: Deformación vertical de compresión en la capa.
 k4 a k5: Coeficientes empíricos de regresión.

Modelo	k4	k5	Observaciones
<input checked="" type="radio"/> Asphalt Institute (1982)	1.3650E-09	4.477	Huella de 12.7 mm.
<input type="radio"/> Shell Oil (1978 - 1985)	6.1500E-07	4.000	Confiabilidad = 50%
<input type="radio"/>	1.9400E-07	4.000	Confiabilidad = 85%
<input type="radio"/>	1.0500E-07	4.000	Confiabilidad = 95%
<input type="radio"/> TRRL (UK)	6.1800E-08	3.950	Huella de 10.2 mm. R=50%
<input type="radio"/> Belgian CRR	3.0500E-09	4.350	
<input type="radio"/> Chevron	1.3379E-09	4.484	Datos de California
<input type="radio"/> Nottingham	1.1262E-06	3.571	
<input type="radio"/> MnROAD	6.0256E-08	3.870	
<input type="radio"/> Guía Francesa (1994)	2.2267E-09	4.505	Tráfico >= T3
<input type="radio"/>	8.1367E-09	4.505	Tráfico < T3

☐ USUARIO

El nivel de tráfico T3 de la Guía Francesa de Diseño de 1994 corresponde a un promedio diario de por lo menos 50 vehículos pesados sobre el carril de diseño en el PRIMER año de operación del pavimento.

Fuente: Adaptado de WinDepav 2.6

Por último, se debe seleccionar el modelo de carga (figura 14) que actuarán el pavimento, en donde se deben seleccionar tres parámetros que son: El radio del área de contacto, distancia entre ruedas y presión de contacto (ilustración). Al igual que las demás ventanas se tiene modelos predeterminados, en este caso para Colombia como se mencionó anteriormente se usará el modelo del ministerio de obras públicas (MOPT UNICAUCA). De acuerdo a los resultados compararemos las deformaciones a tracción, deformaciones verticales y esfuerzos a tracción, con los calculados anteriormente.

Carga en la superficie del pavimento

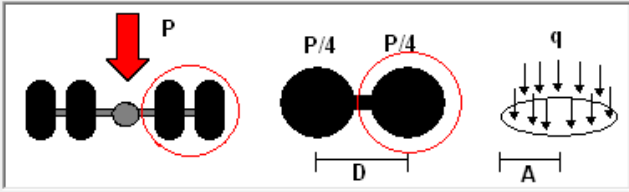
Radio del área de contacto (cm)

Distancia entre ruedas (cm)

Presión de contacto (kgf/cm²)

Figura 14. Interfaz Modelo de carga

Geometría del semieje de carga sobre el pavimento



Modelo	P(ton.)	A (cm)	D (cm)	q (kgf/cm²)
<input checked="" type="radio"/> MOPT UNICAUCA	8.200	10.8	32.4	5.594
<input type="radio"/> ASPHALT INSTITUTE	8.164	11.5	34.5	4.912
<input type="radio"/> SHELL OIL	8.156	10.5	31.5	5.887
<input type="radio"/> GUÍA FRANCESA 1994	13.26	12.5	37.5	6.752
<input type="radio"/> RUEDA SENCILLA	8.200	15.0	0.00	5.800
<input type="radio"/> Definido por el usuario	<input type="text" value="8.200"/>	<input type="text" value="10.8"/>	<input type="text" value="32.4"/>	<input type="text" value="5.594"/>

Para una rueda sencilla emplee D = 0.0 cm.

El programa calcula la presión de contacto.

Fuente Adaptado de WinDepav 2.6

8. ALCANCES Y LIMITACIONES

Se analizó el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del Invias, realizando los 19 chequeos de las 6 alternativas de diseño para pavimentos sin afirmado existente con base en las 4 categorías de la subrasante (Tabla 11) en función del CBR, por medio del método racional utilizando el software WinDEPAV 2.6 como herramienta para el análisis de las modelaciones, determinando si son estructuras confiables para guía de diseño de pavimentos con bajo volumen de tráfico, asimismo se hicieron modelaciones nuevas para ver las posibles fallas expuestas en el manual para el uso de las alternativas.

Al no tener un proyecto en específico a diseñar, se tomaron los valores típicos y recomendados para las estructuras de pavimentos presentados por el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para bajos volúmenes de tránsito, ya que no se tiene información directa de cada tipo de mezcla propuesta, además se determinaron los módulos resilientes mediante ecuaciones empíricas, puesto al ser diversas alternativas estructurales no se contará con ensayos in situ o de laboratorio del comportamiento de material granular a usar.

9. ANALISIS Y RESULTADOS

Se hace la comparación de los resultados que arroja el programa WinDepav con las deformaciones y esfuerzos admisibles calculados respectivamente, teniendo en cuenta los parámetros típicos y mínimos propuestos por Invias como lo son los mecánicos, de carga, la presión de contacto y el espesor de las capas del pavimento. Estos valores arrojados por el programa deben ser menores que los valores admisibles calculados.

Tabla 18. Valores admisibles de deformación y esfuerzo

VALORES ADMISIBLES	Para MDC y MDF	$\epsilon_t(\text{microstrain})$	126
	Para la sbr	$\epsilon_z(\text{microstrain})$	869
	Para BEE	$\epsilon_t(\text{microstrain})$	119
	Para BEC	$\sigma_t(\text{Kg/cm}^2)$	13.7

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 20, se presentan los resultados de la modelación para las diferentes alternativas estructurales propuestas por invias, adoptando valores mínimos anteriormente mencionados para la categoría de subrasante S1 con un valor adoptado de 3% que trae un mejoramiento de subrasante a 5%, en esta categoría se analizaran los valores de deformación a tracción para MDF y MDC, deformaciones verticales para las subrasantes y esfuerzo a tracción para BEC presentada solamente para la alternativa 6.

Tabla 19. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S1

Valores mínimos			
	S1 _(valor adoptado 5%)		
	ϵ_t MDC-	ϵ_z SBR	σ_t BEC
	MDF(microstrain)	(microstrain)	(Kg/cm ²)
ALT. 1	-	806	-
ALT. 2	-	-	-
ALT. 3	271	536	-
ALT. 4	-	-	-
ALT. 5	340	584	-
ALT. 6	238	209	4.62

Fuente: Elaboración propia

En los resultados se observa que para todas las alternativas estructurales dispuestas para la categoría de subrasante S1 las deformaciones verticales cumplen satisfactoriamente, deduciendo que no se presentaran fallas en la subrasante asociadas al ahuellamiento, pero las deformaciones a tracción presentadas en la fibra inferior de las capas de rodadura en las alternativas 3, 4 y 5 son muy elevadas y seguramente se presentara de manera prematura la falla a fatiga en cada una de las alternativas.

Para la alternativa 1 solo se tiene en cuenta la deformación vertical, ya que esta alternativa tiene un tratamiento superficial doble, asumiendo que no implicara de manera permanente en la vida útil del pavimento un aporte importante de resistencia sino más de recubrimiento y protección a la estructura del pavimento. El esfuerzo a tracción cumple para la alternativa 6 que lleva base estabilizada de cemento. De manera resumida se observa de acuerdo a los resultados que los espesores mínimos propuestos por invias para alternativas estructurales en la categoría S1 (3% < CBR) de subrasante son insuficientes para evitar los agrietamientos por fatiga con valores típicos y mínimos estipulados para bajos volúmenes de tránsito.

En la tabla 21, se observa los resultados de la modelación para la categoría S2 de la subrasante (3 < CBR < 5), esta modelación presenta valores mayores a los admisibles en todas las deformaciones tanto a tensión como verticales, sin tener en cuenta el esfuerzo a tracción y la deformación vertical para la alternativa 6, las alternativas estructurales usadas para esta categoría de subrasante son insuficientes ya sean probablemente por los espesores propuestos o por sus

propiedades mecánicas presentadas en las capas de la estructura, se presentaran los dos mecanismos de falla que se desean controlar, la fatiga y ahuellamiento.

Tabla 20. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S2

Valores mínimos			
	S2 _(valor adoptado 4%)		
	ϵ_t MDC- MDF(microstrain)	ϵ_z SBR (microstrain)	σ_t BEC (Kg/cm ²)
ALT. 1	-	1390	-
ALT. 2	-	-	-
ALT. 3	374	991	-
ALT. 4	-	-	-
ALT. 5	359	972	-
ALT. 6	250	239	4,59

Fuente: Elaboración propia

Los valores de la modelación presentada en la tabla 22, quien están establecidos bajo una categoría de subrasante S3 ($5 < \text{CBR} < 10$) nos muestra un buen comportamiento en las deformaciones verticales siendo menores a la admisibles, pero exceptuando a la alternativa 1 donde su deformación en la modelación es mayor a la admisible. Para las deformaciones a tracción se siguen presentando valores muy altos tanto para mezclas densas en frio y en caliente, en base a esto y aclarando que no cumplen en ninguna alternativa aplicada sus deformaciones a tracción; habrá falla por fatiga presentándose en la parte inferior de la capa de rodadura. Se verifican los esfuerzos a tracción modelados para la alternativa 2 y 6 cumpliendo de manera efectiva evitando la falla a fatiga para su respectiva base estabilizada de cemento.

Tabla 21. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S3

Valores mínimos			
	S3 (valor adoptado 8%)		
	ϵ_t MDC- MDF(microstrain)	ϵ_z SBR (microstrain)	σ_t BEC (Kg/cm ²)
ALT. 1	-	952	-
ALT. 2	-	276	5.51
ALT. 3	314	709	-
ALT. 4	-	-	-
ALT. 5	302	697	-
ALT. 6	223	202	4.59

Fuente: Elaboración propia

En los resultados para la categoría de subrasante S4 (CBR > 10) se presenta en la tabla 23, los valores de deformación a tracción para las capas de rodadura son mayores a los admisibles; siendo cada vez más bajos a medida que hay un CBR más alto pero siguiendo sin cumplir en todas las alternativas lo que se traduce a fallas de fatiga en la parte inferior de la carpeta asfáltica, a excepción de la alternativa 4 que solo se modela para la categoría S4 de subrasante; cumple su deformación a tracción para la capa de rodadura pero en esta alternativa también se evalúa dicha deformación para su base estabilizada con emulsión en donde la admisible para esta capa es de $\epsilon_t(\text{microstrain}) = 119.46$ y su deformación en la modelación es de $\epsilon_t(\text{microstrain}) = 127$ siendo valores relativamente cercanos, pero sin cumplir porque la deformación es mayor a la admisible. Tanto las deformaciones verticales para todas las alternativas, como los esfuerzos a tracción para la alternativa 2 y 6 cumplen, ya que son menores a los valores admisibles, teniendo de manera controlada problemas de ahuellamiento que se puedan presentar en la subrasante o de fatiga en las bases estabilizadas respectivamente.

Tabla 22. Resultados de esfuerzos y deformaciones categoría S4

Valores mínimos				
	S₄ (valor adoptado 12%)			
	ϵ_t MDC-	ϵ_t BEE	ϵ_z SBR	σ_t BEC
	MDF(microstrain)	(microstrain)	(microstrain)	(Kg/cm ²)
ALT. 1	-	-	645	-
ALT. 2	-	-	224	4.7
ALT. 3	265	-	499	-
ALT. 4	32	127	272	-
ALT. 5	256	-	492	-
ALT. 6	200	-	168	3.518

Fuente: Elaboración propia

Se hizo la respectiva determinación de las propiedades mecánicas de los materiales a usar para la modelación, que de manera resumida teniendo en cuenta los valores dados por el manual para pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y valores típicos para estas estructuras basados en diversos proyectos de investigación, se obtuvo el módulo de elasticidad para MDC de 28122.78 kg/cm² y para MDF de 24607.43 kg/cm² teniendo en cuenta los coeficientes estructurales propuestos por Invias en este tipo de mezclas. Para la determinación de los módulos resilientes de las bases y subbases se usó las ecuaciones empíricas de Reyes, 2015 en donde se tienen en cuenta los espesores de las capas y los módulos subyacentes de cada una de ellas, para los módulos de las subrasantes se usó la ecuación presentada por el manual hasta CBR menores al 10% y para mayores se usó los soportados en el libro de Reyes, 2015. Para BEE se estipuló un módulo típico de 35190 kg/cm² y para BEC de 50000 kg/cm². Todos estos datos están presentados en la fase de recolección de datos y se tomaron de manera que se pudiera simular de la forma más típica posible en busca de la mejor obtención de resultados.

Una vez modelado los datos para cada una de las 6 alternativas estructurales sin afirmado existente propuestas por Invias, nos fijamos de manera más resumida en la tabla 24 que de las 19 modelaciones posibles, solamente 4 de ellas no presentarán ninguna falla para su periodo de diseño pertenecientes a las que no tienen una mezcla asfáltica si no solo un tratamiento superficial doble (TSD), esto no quiere decir que tanto la alternativa 1 como la 2 sean las mejores para el uso de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito, si no que al proponer esta estructura independientemente que cumpla, mientras el TSD cumpla su función de otorgar una cubierta impermeable a la superficie existente (base granular) esta durara su periodo de diseño, pero este TSD al no tener un aporte significativo en la resistencia

del pavimento tiende a tener muy baja durabilidad y de la misma manera a que se pueda presentar filtración de agua y una falla prematura en el pavimento.

Tabla 23. Resumen de fallas en las alternativas estructurales

¿Presentaran fallas?				
	S1	S2	S3	S4
ALT. 1	NO	SI	SI	NO
ALT. 2	-	-	NO	NO
ALT. 3	SI	SI	SI	SI
ALT. 4	-	-	-	SI
ALT. 5	SI	SI	SI	SI
ALT. 6	SI	SI	SI	SI

Fuente: Elaboración propia

Aunque el manual nos presenta la BEC (Base estabilizada de cemento) y la BEE (Base estabilizada con emulsión) para suplir necesidades estructurales cuando los agregados pétreos para bases y subbases granulares sean escasos en la zona del proyecto, estos presentan esfuerzos a tracción mucho menores a los admisibles para el caso de la BEC y se puede observar en la alternativa 2 para S3 y S4 siendo parte de las 4 alternativas que no presentaran fallas estructurales y que independientemente en la alternativa 6 de que probablemente presenten fallas a fatiga, esta también tiene una bajo esfuerzo a tracción en su respectiva capa. Para el caso de BEE quien se presenta solo en la alternativa 4, su deformación a tracción es relativamente cercana a la admisible y lo más probable es que con una capa que por cuestiones constructivas sea de 20 cm cumplirá de manera efectiva su periodo de diseño estipulado. Cabe mencionar que las deformaciones verticales presentadas en la categoría S1 cumplen siendo más bajas hasta básicamente las presentadas en la categoría S3 y esto se debe a que como en la S1 se presenta un suelo de mejoramiento, ayuda a controlar y proteger de mejor manera una falla por ahuellamiento en la subrasante.

El manual nos hace referencia a una presentación de alternativas estructurales que en este caso fueron estudiadas sin afirmado existente, explicándonos que son estructuras con una alta flexibilidad, es decir, son capaces de absorber grandes deflexiones sin desfigurarse. Pero de acuerdo a los resultados de la mayoría de estas estructuras tipo propuestas por el manual, no son la mejor alternativa en el diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito.

Cuando hablamos de que no son la mejor alternativa no hacemos referencia directamente al tipo de material que compone las capas de la estructura en las diferentes alternativas, si no a base de los resultados presentados exponiéndolas al caso más crítico que sería con 500.000 ejes equivalentes; se presentan en la mayoría un buen comportamiento de deformaciones verticales evitando la falla por ahuellamiento en la superficie de la subrasante, pero se arrojan excesos de deformaciones a tracción en casi todas las capas de rodadura modeladas.

Con base en esto es muy probable que se presenten estos valores en las capas de rodadura ya sea por el módulo de elasticidad hallado con el coeficiente estructural propuesto por el manual o por los espesores mínimos de las capas que componen las alternativas. Dicho anteriormente esto, se hizo la modelación de las alternativas 5 y 6 para las cuatro categorías de subrasante. Con los parámetros recomendados por Invias (2007) para capas de rodadura conformadas por una mezcla asfáltica tipo MDC-2 (Rondón y Reyes, 2015), nos recomiendan un coeficiente estructural de 0.44 (tabla 25) siendo un valor más alto al que nos da el manual para bajos volúmenes de tránsito que es de 0.41 (anteriormente presentado en la recolección de datos), el valor para la mezcla asfáltica será de $E \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 32341.20$. Los valores de los módulos para las capas granulares no tratadas se escogieron de categoría 1 para base y subbase tabla 26 para bajo volúmenes de tránsito (Rondón y Reyes, 2015).

Tabla 24. Coeficientes estructurales recomendados

TMAP [°C]	a_1 [-]
10	0.50
15	0.47
20	0.44
25	0.41
30	0.37

Fuente: (Rondón y Reyes, 2015)

Tabla 25. Modulo para capas granulares no tratadas

PAVIMENTOS CON TRÁFICO BAJO (T1 A T3)				
CAPA DE BASE	Categoría 1: E = 600MPa ¹			
	Categoría 2: E = 400MPa ¹			
	Categoría 3: E = 200MPa ¹			
CABA DE SUBBASE (subdividida en sub capas de 25 cm de espesor de abajo hacia arriba)	$E(1)=K E_{sub}$			
	$E(i)=K E(i-1)$			
	K depende del tipo de material			
		CATEGORÍA ⁽¹⁾		
	Material	1	2	3
K	3	2.5	2	
E<360MPa				

Fuente: (Rondón y Reyes, 2015)

Una vez hecha las modelaciones se presenta en la tabla 27 los resultados obtenidos para la alternativa 5 con valores de la subbase para S1, S2, S3, y S4 de 1509.57 kg/cm², 1308.66 kg/cm², 2039.31 kg/cm² y 3230.46 kg/cm² respectivamente. Estos resultados nos muestran un comportamiento mucho mejor tanto en deformaciones verticales y en deformaciones a tracción, cumpliendo en todas las categorías de subrasante las deformaciones verticales, pero a pesar de que los valores en las deformaciones a tracción son mucho más bajos en esta modelación que cuando se hizo con los valores típicos y mínimos; el pavimento seguirá fallando a fatiga porque los resultados muestran valores mayores a los admisibles para cada categoría de subrasante.

Tabla 26. Resultados de esfuerzos y deformaciones alternativa 5

ALTERNATIVA 5		
Categoría sbr	$\epsilon_t \text{ MDC}$	$\epsilon_z \text{ SER}$
	MDF (microstrain)	(microstrain)
S1 (valor adoptado 5%)	158	449
S2 (valor adoptado 4%)	161	713
S3 (valor adoptado 8%)	155	543
S4 (valor adoptado 12%)	155	418

Fuente: Elaboración propia

Se hizo una propuesta en la que cumpliera con todos los parámetros en este caso de deformaciones a tracción y verticales para la alternativa 5 (tabla 28), reflejándose espesores de manera descendente desde la capa de rodadura para S1 de: 10.5 cm, 30 cm, 30 cm, 25 cm. Para S2 de: 11 cm, 28 cm, 30 cm. Para S3 de: 10.5 cm, 30 cm, 30 cm. Para S4 de: 10.5 cm, 30 cm, 30 cm. Se observan según los resultados, datos esperados como lo eran un mejoramiento en el comportamiento de la estructura con deformaciones más bajas gracias al mejoramiento de propiedades mecánicas de los materiales y a un cambio de espesor en las capas de la alternativa; verificando que el manual para bajos volúmenes de tránsito presenta unos valores más bajos al promedio en módulos para diferentes capas que conforman una estructura del pavimento y teniendo en cuenta que Invias busca facilitar los modelos constructivos, pero manteniendo los espesores propuestos por ellos y nos damos cuenta de que no siempre será así. Con los resultados obtenidos de las modelaciones con los valores mínimos y típicos se hubiese dado espesores en la capa de rodadura probablemente hasta más de 5 cm de los propuestos para esta alternativa.

Tabla 27. Resultados de esfuerzos y deformaciones propuesta alternativa 5

ALTERNATIVA 5 PROP.		
Categoría sbr	ϵ_t MDC	ϵ_z SBR
	MDF (microstrain)	(microstrain)
S1 (valor adoptado 5%)	126	189
S2 (valor adoptado 4%)	126	269
S3 (valor adoptado 8%)	126	201
S4 (valor adoptado 12%)	126	151

Fuente: Elaboración propia

Como se había mencionado anteriormente, también se hizo la modelación en la alternativa 6 con los parámetros anteriormente mencionados para dichas modelaciones nuevas y tomando de entrada los espesores mínimos propuestos por Invias para estas alternativas (7.5 cm, 15 cm, 20 cm) fueron óptimos de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 29 para garantizar una estructura segura y duradera a lo largo de su periodo de diseño sin que vayan a presentar los mecanismos de falla que se desean controlar siendo la fatiga y el ahuellamiento. Sé verifica nuevamente que los valores que da invias para el diseño de las estructuras como lo son por ejemplo el coeficiente estructural, son relativamente bajos a los

típicos en un pavimento y no teniendo como problemática los diferentes materiales que conforman la estructura.

Tabla 28. Resultados de esfuerzos y deformaciones alternativa 6

ALTERNATIVA 6			
Categoría sbr	ϵ_t MDC MDF (microstrain)	ϵ_z SBR (microstrain)	σ_t BEC (Kg/cm ²)
S1 _(valor adoptado 5%)	120	168	3.95
S2 _(valor adoptado 4%)	121	194	3.9
S3 _(valor adoptado 8%)	123	171	3.56
S4 _(valor adoptado)	125	149	3.2

Fuente: Elaboración propia

10.DISCUSIONES

En la investigación propuesta por los ingenieros Erasmo Hernández y Juan Culma para optar al título de especialistas en Diseño y Construcción de pavimentos, de la Universidad Cooperativa de Colombia. Se hizo el diseño de pavimento flexible de la vía barrio mirador en el municipio de Melgar Tolima. Resumidamente se hizo un diseño de la estructura de pavimento flexible, utilizando la metodología invias para bajos volúmenes de tránsito, los resultados por el método empírico fueron un espesor de 5 cm para la capa de rodadura, 15 cm para la base y 15 cm para la subbase, siendo muy similares a los mínimos propuestos por invias en sus alternativas. Procedieron a hacer el chequeo por ahuellamiento (descartaron el chequeo por fatiga por el bajo volumen de tránsito de la zona) con el método racional con ayuda del software WinDepav 2.6 optaron usar y modelar la alternativa estructural 5 la cual se acogía mejor a su propuesta estructural.

Los resultados de la modelación fueron sus deformaciones verticales mayores a las admisibles concluyendo que los espesores propuestos por la metodología empírica no eran suficientes para evitar la acumulación de deformaciones permanentes excesivas. Así mismo se procedió a hacer una segunda simulación con espesores de 15 cm de base granular y se subdividieron la capa de subbase en tres partes con dos de 10 cm y una de 15 cm, sus resultados cumplieron ante las deformaciones admisibles siendo suficientes para evitar el agrietamiento por ahuellamiento. Esta investigación nos demuestra que para las alternativas estructurales propuestas con Invias para bajos volúmenes de tránsito, es necesario una modelación para su chequeo, ya que se pueden presentar cambios en los espesores de la estructura si el problema no está asociado con las propiedades mecánicas de los materiales.

11. CONCLUSIONES

- Tras el análisis, haciendo las respectivas modelaciones de las alternativas con el programa WinDepav y teniendo en cuenta algunos de los parámetros mínimos propuestos por el manual para bajos volúmenes de tránsito de Invias y valores típicos en estas estructuras de pavimento, los resultados arrojaron para cada alternativa propuesta en las 4 categorías de subrasante; una buena respuesta a las deformaciones verticales en la mayoría de modelaciones que se puedan presentar sobre la subrasante, siendo menores a las admisibles y evitando fallas por ahuellamiento en la estructura. Por otro lado, para verificar el comportamiento por fatiga, se presentaron resultados deficientes para la fibra inferior de las capas de rodadura en básicamente todas las modelaciones, concluyendo que, seguramente habrá fallas prematuras por fatiga en los pavimentos porque sus deformaciones a tracción son mucho más altas a las admisibles.
- Se concluye luego de hacer el chequeo de las alternativas, gracias a las nuevas modelaciones para todas las categorías de subrasante, pero solo con la alternativa 5 y 6 y con valores en las propiedades mecánicas de los materiales un poco más altos (comunes), que las alternativas estructurales sin afirmado existente propuestas por Invias para bajos volúmenes de tránsito, siendo dichas alternativas de gran utilidad, ya que ayudan al ingeniero a plantear las modelaciones con diversas resistencias de subrasante para un proyecto con diferentes condiciones, como por ejemplo el uso de cemento Portland o emulsión asfáltica para suplir necesidades cuando los agregados pétreos sean escasos en la zona del proyecto o también dependiendo del presupuesto que se tenga. Sin embargo, no se recomienda adoptar los valores estructurales del manual para determinar las propiedades mecánicas de los materiales siendo muy bajos comparados a los típicos en estas estructuras, influyendo de manera directa en el comportamiento del pavimento a usar. Se sugiere hacer un chequeo por el método racional para verificar los mejores espesores para las capas que componen la estructura, ya que si no presenta problemas en determinación de las propiedades mecánicas de los materiales, posiblemente necesite cambio los espesores de las capas que componen la estructura del pavimento.
- Las únicas alternativas que no presentaran fallas, son en su mayoría con tratamiento superficial doble, recalcando que no significa que estas sean las mejores estructuras entre las alternativas, ya que esta al tener un TSD y no una mezcla asfáltica, este TSD no aportará una resistencia significativa a la estructura, sino más bien de recubrimiento e impermeabilización, que durante un tiempo menor al de diseño se termina desgastando y permitiendo

filtración de agua en la estructura. Por estos motivos solamente se verificaron sus deformaciones verticales siendo menores a las admisibles.

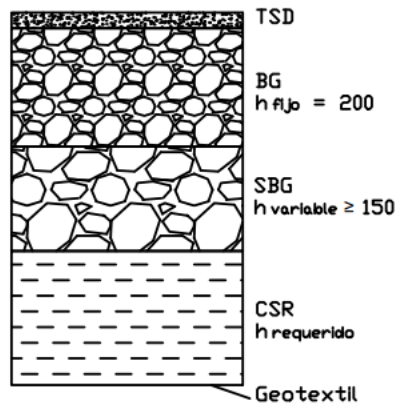
- Para la alternativa 4, propuestas solo para los suelos con CBR mayores a 10% cumplen la deformación a tracción para la mezcla asfáltica y la deformación vertical para la subrasante, pero no cumple su deformación a tracción en la base estabilizada con emulsión asfáltica; se concluye que al no cumplir por un valor relativamente muy cerca al admisible es probable que con un espesor de 20 cm cumpla la estructura del pavimento.
- Se concluye que de acuerdo a los resultados presentados para la categoría S2 con un valor de CBR igual a 4%, se deben hacer mejoramientos en la subrasante para tener un buen comportamiento con una capa usualmente de terraplén y de tal manera no presentar fallas por ahuellamiento, de esta forma usar las alternativas estructurales de mínimo CBR del 5% para la subrasante. Con estos mejoramientos se pudo evidenciar en los resultados para categoría S1, se presentaron deformaciones verticales más bajas hasta para un CBR de 8% modelados por el programa.
- Independientemente de que no se hayan mencionado las alternativas estructurales con afirmado existente, es evidente que al presentarse dicho afirmado abaratan los costos de las estructuras, ya que aportarán una mayor estabilidad en esta. El manual aconseja no tocar el afirmado y considerar una subrasante de CBR= 3% siendo muy similar a las alternativas para la categoría S1.
- El factor de daño, no mencionado directamente en el documento, pero adicionalmente presentado en los resultados del programa; es un plus que da el software WinDepav siendo la relación del número de ejes equivalentes de diseño y el número de ejes admisibles calculados por el programa, esto indica que la estructura si cumplirá con el número de ejes de diseño para su periodo de diseño estructural.
- En la investigación propuesta por los ingenieros Erasmo Hernández y Juan Culma de la Universidad Cooperativa de Colombia, se evidencia que a la hora de utilizar la metodología de Invias para bajos volúmenes de tránsito y modelar en un programa por el método racional, se puede chequear una estructura que no pueda soportar las deformaciones y tengan fallas estructurales antes de cumplir su periodo de diseño estructural ligadas a espesores deficientes.

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda verificar por el método racional, las estructuras diseñadas con un método empírico para pavimentos flexibles con bajo volumen de tráfico, verificando que dicha estructura diseñada si cumpla con los dos mecanismos de falla que se desean controlar, el ahuellamiento y la fatiga. Así mismo se tendrán los espesores de las capas que conforman la estructura más óptimos y que garanticen la duración de su periodo de diseño estructural.
- Para investigaciones futuras se recomienda estudiar las alternativas estructurales con afirmado existente propuestas por el manual de pavimentos flexibles para bajos volúmenes de tránsito de Invias, analizando cómo son sus comportamientos ante las fallas a fatiga y ahuellamiento, comparando con las estructuras sin afirmado existente y asimismo determinar cuáles son las ventajas y desventajas entre las dos.
- El manual de pavimentos flexibles para bajos volúmenes de tráfico nos da la posibilidad de usar materiales no convencionales para la construcción de la estructura como: Los denominados asfaltos naturales (asfálticas), crudos pesados, cemento Portland aditivado, la cal, los estabilizantes electroquímicos (aceites sulfanados) y los productos hidrofobantes. Si se demuestra a Invias sin lugar a ninguna duda, que el comportamiento del pavimento será satisfactorio y que los costos son menores a las alternativas propuestas por el manual, se podrán plantear y analizar tales alternativas; siendo una opción anteriormente recomendada, el diseño y la verificación por el método racional.

13.ANEXOS

Anexo 1. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S1



Fuente: INVIAS

Anexo 2. Modelación alternativa 1, S1

ALTERNATIVA 1 - S1

Archivo:

numero de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión		N esperado	Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)*k3	k2		k4	k5	N esperado	
1	2490.52	0.35	20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	946.14	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	503.19	0.4	25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	362.86	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			1.3650E-09	4.4770	?	500000

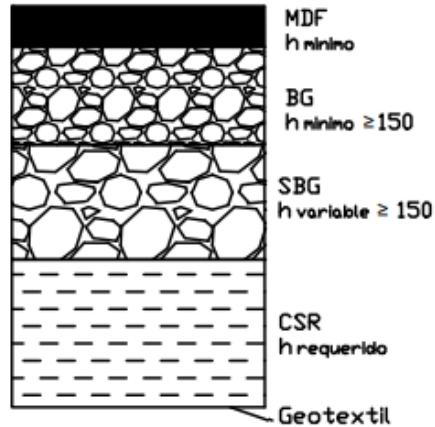
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	2.490E+03	0.35	0.00	6.261E+00	5.598E+00	915.0			-400.0		
	Continua		20.00	-1.560E+00	1.336E+00	-661.0			912.0		
2	9.463E+02	0.35	20.00	-1.611E-01	1.336E+00	-661.0			1460.0	6.7659E+03	73.900
	Continua		35.00	-4.558E-01	6.118E-01	-598.0			926.0		
3	5.027E+02	0.40	35.00	-3.946E-02	6.118E-01	-598.0			1220.0	1.5118E+04	33.073
	Continua		60.00	-8.668E-02	2.906E-01	-350.0			701.0		
4	3.630E+02	0.40	60.00	-8.392E-03	2.906E-01	-350.0			806.0	9.6710E+04	5.170

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 3. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S1



Fuente: INVIAS

Anexo 4. Modelación alternativa 3, S1

ALTERNATIVA 3 - S1

Número de capas

2

3

4

5

6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

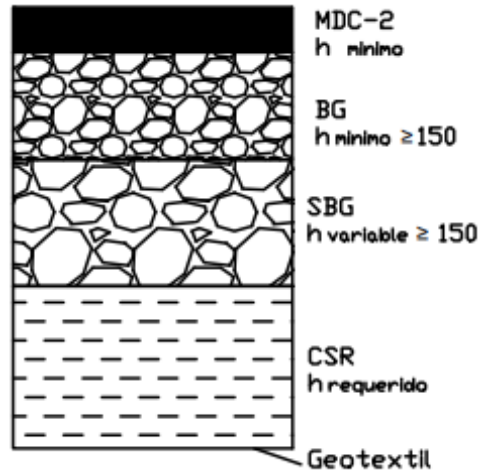
Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión				Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)^k3	k2	?	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	24607.43	0.35	¿E?	7.5	✓	2.9279E-07	3.2910	?	500000	✓		
2	3291.31	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770
3	1218.7	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770
4	503.19	0.4	¿E?	25	✓					✓	1.3650E-09	4.4770
5	362.86	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5													
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)		Sigma Z (kgf/cm²)		Tracción (fatiga)			Compresión		
								Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	2.461E+04	0.35	0.00	1.632E+01	B	5.598E+00	A	378.0	B				
	Continua		7.50	-8.086E+00	B	2.774E+00	B	-271.0	B	1.6057E+05	3.114	335.0	A
2	3.292E+03	0.35	7.50	2.111E-01	B	2.774E+00	B	-271.0	B			779.0	A
	Continua		22.50	-1.407E+00	C	7.434E-01	B	-408.0	C			481.0	B
3	1.219E+03	0.35	22.50	-2.763E-01	C	7.434E-01	B	-408.0	C			721.0	B
	Continua		37.50	-4.833E-01	C	3.712E-01	C	-390.0	C			557.0	C
4	5.027E+02	0.40	37.50	-5.619E-02	C	3.712E-01	C	-390.0	C			798.0	C
	Continua		62.50	-6.475E-02	C	1.876E-01	C	-234.0	C			469.0	C
5	3.630E+02	0.40	62.50	-1.173E-02	C	1.876E-01	C	-234.0	C			536.0	C

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 5. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S1



Fuente: INVIAS

Anexo 6. Modelación alternativa 5, S1

ALTERNATIVA 5 - S1

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

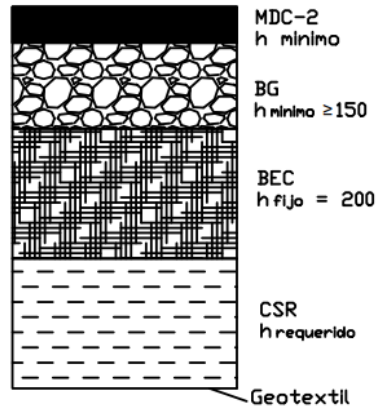
Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	28122.78	0.35	7.5	✓	1.2722E-06	3.2910	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	500000
2	2270.69	0.35	15	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
3	946.14	0.35	15	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
4	503.19	0.4	25	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
5	362.86	0.4		✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5		Tracción (fatiga)				Compresión					
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.948E+01	5.598E+00	412.0	B		-254.0	B	
	Continua		7.50	-1.234E+01	2.325E+00	-340.0	B	6.7911E+04	371.0	A	
2	2.271E+03	0.35	7.50	1.642E-01	2.325E+00	-340.0	B		952.0	B	4.5896E+04
	Continua		22.50	-1.061E+00	7.485E-01	-475.0	C		598.0	C	
3	9.463E+02	0.35	22.50	-2.050E-01	7.485E-01	-475.0	C		886.0	C	6.3310E+04
	Continua		37.50	-3.508E-01	4.069E-01	-418.0	C		663.0	C	
4	5.027E+02	0.40	37.50	-5.455E-02	4.069E-01	-418.0	C		866.0	C	7.0124E+04
	Continua		62.50	-7.077E-02	2.039E-01	-255.0	C		510.0	C	
5	3.630E+02	0.40	62.50	-1.305E-02	2.039E-01	-255.0	C		584.0	C	4.0917E+05

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 7. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S1



Fuente: INVIAS

Anexo 8. Modelación alternativa 6, S1

ALTERNATIVA 6 - S1

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahueamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión					
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado			
1	28122.78	0.35	7.5	✓	2.6124E-07	3.2910	?	500000					
2	2397.13	0.35	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	50000	0.2	20	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	503.19	0.4	25	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
5	362.86	0.4		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

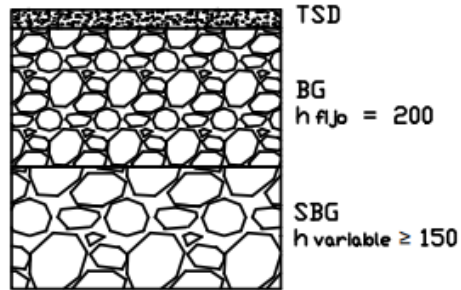
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.

Número de capas: 5

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión				
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.387E+01	B	5.598E+00	A	267.0	B	-132.0	B		
	Continua		7.50	-8.566E+00	A	2.784E+00	B	-238.0	B	310.0	A		
2	2.397E+03	0.35	7.50	6.791E-01	B	2.784E+00	B	-238.0	B	960.0	A	4.4208E+04	11.310
	Continua		22.50	9.167E-01	C	1.458E+00	B	40.2	C	342.0	B		
3	5.000E+04	0.20	22.50	2.845E+00	C	1.458E+00	B	40.2	C	14.4	A	6.4736E+12	0.000
	Continua		42.50	-4.619E+00	C	1.315E-01	C	-76.8	C	37.3	C		
4	5.027E+02	0.40	42.50	2.641E-02	C	1.315E-01	C	-76.8	C	215.0	C	3.5876E+07	0.014
	Continua		67.50	-4.130E-03	C	8.688E-02	C	-75.7	C	178.0	C		
5	3.630E+02	0.40	67.50	1.315E-02	C	8.688E-02	C	-75.7	C	209.0	C	4.0723E+07	0.012

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 9. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S2



Fuente: INVIAS

Anexo 10. Modelación alternativa 1, S2

ALTERNATIVA 1 - S2

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión		Daño por compresión				
					$C^*k1*(1/E)^{k3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	2318.15	0.35	¿E?	20	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	853.08	0.35	¿E?	15	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	436.22	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

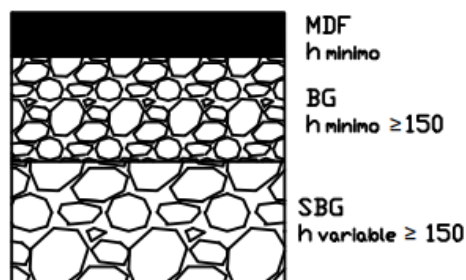
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas:

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión	
				Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)
1	2.318E+03	0.35	0.00	6.200E+00	5.598E+00	972.0	-392.0
	Continua		20.00	-1.621E+00	1.326E+00	-729.0	995.0
2	8.535E+02	0.35	20.00	-1.591E-01	1.326E+00	-729.0	1610.0
	Continua		35.00	-4.415E-01	6.302E-01	-660.0	1040.0
3	4.364E+02	0.40	35.00	-8.433E-03	6.302E-01	-660.0	1390.0

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 11. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S2



Fuente: INVIAS

Anexo 12. Modelación alternativa 3, S2

ALTERNATIVA 3 - S2

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahueamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					$C^*k_1^4(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	24607.43	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9279E-07	3.2910	500000	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
2	2116.18	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
3	853.08	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
4	436.22	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000

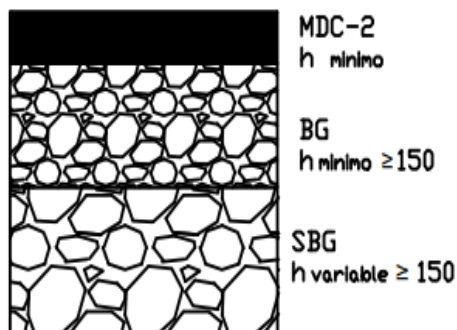
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión					
				Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	2.461E+04	0.35	0.00	1.876E+01	5.598E+00	452.0	5.5621E+04	8.989	-273.0		
	Continua		7.50	-1.183E+01	2.386E+00	-374.0			413.0		
2	2.116E+03	0.35	7.50	1.652E-01	2.386E+00	-374.0			1050.0	2.9598E+04	16.893
	Continua		22.50	-1.081E+00	7.587E-01	-522.0			652.0		
3	8.535E+02	0.35	22.50	-1.927E-01	7.587E-01	-522.0			983.0	3.9762E+04	12.575
	Continua		37.50	-3.324E-01	4.273E-01	-459.0			743.0		
4	4.364E+02	0.40	37.50	-2.468E-02	4.273E-01	-459.0			991.0	3.8345E+04	13.039

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 13. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S2



Fuente: INVIAS

Anexo 14. Modelación alternativa 5, S2

ALTERNATIVA 5 - S2

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión		
					C*k1*[1/E]^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado
1	28122.78	0.35	¿E?	7.5	✓	2.6124E-07	3.2910	?	500000	
2	2116.15	0.35	¿E?	15	✓					✓ 1.3650E-09 4.4770 ? 500000
3	853.08	0.35	¿E?	15	✓					✓ 1.3650E-09 4.4770 ? 500000
4	436.22	0.4	¿E?		✓					✓ 1.3650E-09 4.4770 ? 500000

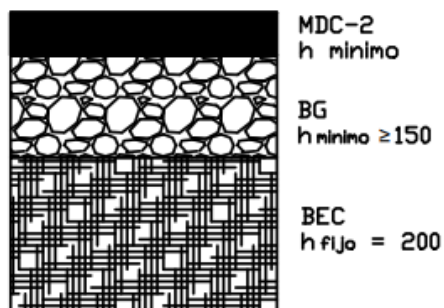
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)			Compresión			
				T (kgf/cm²)	Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.988E+01	B	5.598E+00	A	425.0	B	-265.0	B	
	Continua		7.50	-1.315E+01	B	2.264E+00	B	-359.0	B	5.6784E+04	8.805	384.0 A
2	2.116E+03	0.35	7.50	1.499E-01	A	2.264E+00	B	-359.0	B			995.0 B
	Continua		22.50	-1.061E+00	C	7.413E-01	C	-508.0	C			639.0 C
3	8.535E+02	0.35	22.50	-1.876E-01	C	7.413E-01	C	-508.0	C			963.0 C
	Continua		37.50	-3.253E-01	C	4.191E-01	C	-449.0	C			729.0 C
4	4.364E+02	0.40	37.50	-2.386E-02	C	4.191E-01	C	-449.0	C			972.0 C
												4.1817E+04 11.957

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 15. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S2



Fuente: INVIAS

Anexo 16. Modelación alternativa 6, S2

ALTERNATIVA 6 - S2

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahueamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	C* $k_1^{1/3} \{1/E\}^{1/3}$	k2	N esperado	Daño por tensión	Daño por compresión	N esperado
								k4	k5	
1	28122.78	0.35	7.5	✓	2.6124E-07	3.2910	500000	✓	1.3650E-09	4.4770
2	2233.4	0.35	15	✓				✓	1.3650E-09	4.4770
3	50000	0.2	20	✓				✓	1.3650E-09	4.4770
4	436.22	0.4		✓				✓	1.3650E-09	4.4770

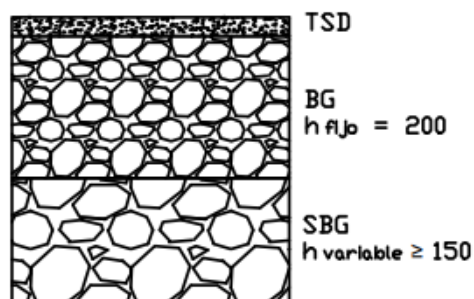
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)	Compresión
						Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.417E+01	5.598E+00	274.0	-137.0
	Continua		7.50	-9.024E+00	2.725E+00	-250.0	919.0
2	2.233E+03	0.35	7.50	6.669E-01	2.725E+00	-250.0	1000.0
	Continua		22.50	9.106E-01	1.448E+00	41.0	367.0
3	5.000E+04	0.20	22.50	2.896E+00	1.448E+00	41.0	13.9
	Continua		42.50	-4.599E+00	1.366E-01	-76.5	37.2
4	4.364E+02	0.40	42.50	3.844E-02	1.366E-01	-76.5	239.0

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 17. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S3



Fuente: INVIAS

Anexo 18. Modelación alternativa 1, categoría S3

ALTERNATIVA 1 - S3

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión		N esperado	Daño por compresión		N esperado
					$C^*k_1^*(1/E)^{k_3}$	k2		k4	k5	
1	2879.09	0.35	20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	1170.29	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	679.77	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

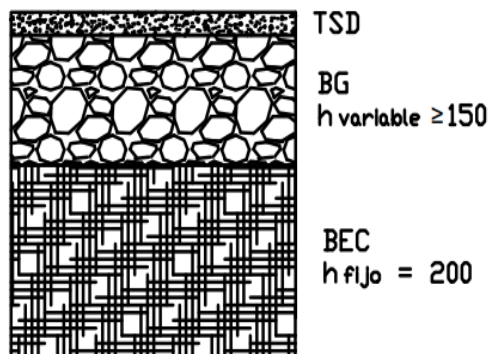
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 3

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Tracción (fatiga)			Compresión			
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	2.876E+03	0.35	0.00	5.976E+00	5.598E+00	728.0	B		-262.0	C	Infinito	
	Continua		20.00	-1.387E+00	1.397E+00	-536.0	C		773.0	B		
2	1.171E+03	0.35	20.00	-1.295E-01	1.397E+00	-536.0	C		1220.0	B	1.5118E+04	33.073
	Continua		35.00	-3.702E-01	6.781E-01	-454.0	C		754.0	C		
3	6.802E+02	0.40	35.00	-6.781E-03	6.781E-01	-454.0	C		952.0	C	4.5896E+04	10.894

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 19. Estructura pavimento alternativa 2, categoría S3



Fuente: INVIAS

Anexo 20. Modelación alternativa 2, S3

ALTERNATIVA 2 - S3

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión		Daño por compresión	
					$C^*k_1^*(1/E)^{k_3}$	k ₂	N esperado	k ₄
1	2761.88	0.35	15	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
2	50000	0.2	20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
3	679.77	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000

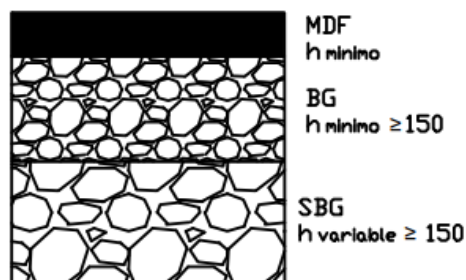
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 3

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)		Compresión	
				T (kgf/cm ²)	Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)
1	2.761E+03	0.35	0.00	4.038E+00	5.598E+00	247.0		1040.0	
	Continua		15.00	2.029E+00	3.375E+00	60.0		734.0	
2	5.000E+04	0.20	15.00	4.160E+00	3.375E+00	60.0		-4.0	
	Continua		35.00	-5.506E+00	2.458E-01	-93.6		44.6	
3	6.802E+02	0.40	35.00	6.669E-02	2.458E-01	-93.6		276.0	

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 21. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S3



Fuente: INVIAS

Anexo 22. Modelación alternativa 3, S3

ALTERNATIVA 3 - S3

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C*k1*[1/E] ³	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	24607.43	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9279E-07	3.2910	500000	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
2	2641.19	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
3	1170.29	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
4	679.77	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000

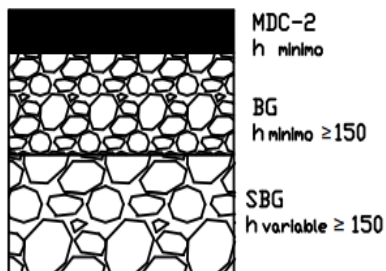
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas:

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)			Compresión		
				T (kgf/cm ²)	Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	2.461E+04	0.35	0.00	1.642E+01	5.598E+00	385.0			-213.0		
	Continua		7.50	-9.626E+00	2.621E+00	-314.0	9.8892E+04	5.056	369.0		
2	2.641E+03	0.35	7.50	2.243E-01	2.621E+00	-314.0			909.0	5.6447E+04	8.858
	Continua		22.50	-9.534E-01	8.402E-01	-400.0			525.0		
3	1.171E+03	0.35	22.50	-1.703E-01	8.402E-01	-400.0			774.0	1.1594E+05	4.313
	Continua		37.50	-2.927E-01	4.803E-01	-330.0			562.0		
4	6.802E+02	0.40	37.50	-2.396E-02	4.803E-01	-330.0			709.0	1.7171E+05	2.912

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 23. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S3



Fuente: INVIAS

Anexo 24. Modelación alternativa 5, S3

ALTERNATIVA 5 - S3

Numero de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	28122.78	0.35	¿E?	7.5	✓	2.9279E-07	3.2910	?	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	2641.19	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1170.29	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	679.77	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

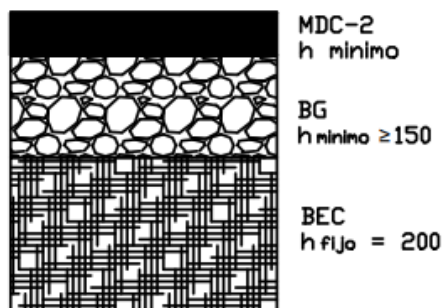
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Tracción (fatiga)			Compresión				
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.744E+01	B	5.598E+00	A	363.0	B	-209.0	B		
	Continua		7.50	-1.081E+01	B	2.488E+00	B	-302.0	B	1.1242E+05	4.448	344.0	A
2	2.641E+03	0.35	7.50	2.029E-01	B	2.488E+00	B	-302.0	B			867.0	B
	Continua		22.50	-9.341E-01	C	8.229E-01	C	-390.0	C			512.0	B
3	1.171E+03	0.35	22.50	-1.672E-01	C	8.229E-01	C	-390.0	C			754.0	B
	Continua		37.50	-2.876E-01	C	4.721E-01	C	-323.0	C			553.0	C
4	6.802E+02	0.40	37.50	-2.356E-02	C	4.721E-01	C	-323.0	C			697.0	C
												1.8534E+05	2.698

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 25. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S3



Fuente: INVIAS

Anexo 26. Modelación alternativa 6, S3

ALTERNATIVA 6 - S3

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	28122.78	0.35	¿E?	7.5	✓	2.6124E-07	3.2910	?	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	2761.88	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	50000	0.2	¿E?	20	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	679.77	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

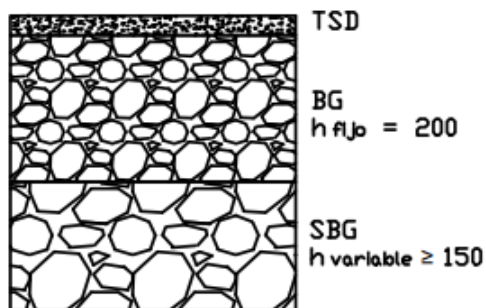
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)			Compresión					
				T (kgf/cm²)	Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.295E+01	B	5.598E+00	A	243.0	B	-110.0	B			
	Continua		7.50	-7.842E+00	A	2.906E+00	B	-223.0	B	2.7212E+05	1.837	297.0	A	
2	2.761E+03	0.35	7.50	6.791E-01	B	2.906E+00	B	-223.0	B	880.0	A	6.5266E+04	7.661	
	Continua		22.50	9.269E-01	B	1.489E+00	B	33.5	C	306.0	B			
3	5.000E+04	0.20	22.50	2.437E+00	C	1.489E+00	B	33.5	C	16.9	A	3.1614E+12	0.000	
	Continua		42.50	-4.058E+00	C	1.754E-01	C	-67.9	C	33.7	C			
4	6.802E+02	0.40	42.50	4.405E-02	C	1.754E-01	C	-67.9	C	202.0	C	4.7432E+07	0.011	

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 27. Estructura pavimento alternativa 1, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 28. Modelación alternativa 1, S4

ALTERNATIVA 1 - S4

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión		
					$C^*k_1^*(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado
1	3510.63	0.35	20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	1592.55	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1076.82	0.4	?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

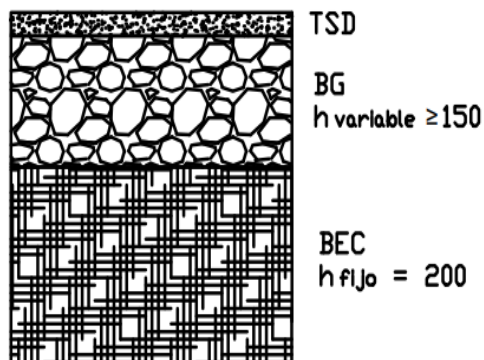
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: ☒ 3

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión	
				Épsilon T (microstrain)	N admisible	Épsilon Z (microstrain)	N admisible
1	3.511E+03	0.35	0.00	5.741E+00	5.598E+00	-169.0	Infinito
	Continua		20.00	-1.152E+00	1.479E+00	612.0	
2	1.593E+03	0.35	20.00	-9.555E-02	1.479E+00	928.0	5.1454E+04
	Continua		35.00	-2.814E-01	7.332E-01	551.0	
3	1.077E+03	0.40	35.00	-3.855E-03	7.332E-01	645.0	2.6226E+05

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 29. Estructura pavimento alternativa 2, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 30. Modelación alternativa 2, S4

ALTERNATIVA 2 - S4

Numero de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión		Daño por compresión					
					$C^*k_1^2(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado		
1	3356.35	0.35	¿E?	15	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	50000	0.2	¿E?	20	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1076.82	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

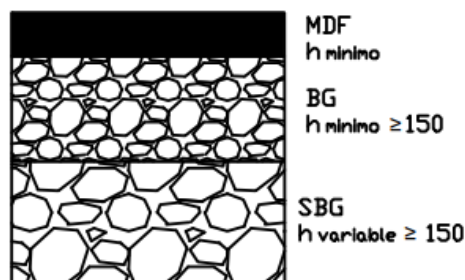
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 3

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Tracción (fatiga)			Compresión				
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	3.356E+03	0.35	0.00	4.048E+00	B	5.598E+00	A	206.0	B	853.0	A	7.5037E+04	6.663
	Continua		15.00	2.009E+00	B	3.355E+00	B	47.9	C	601.0	A		
2	5.000E+04	0.20	15.00	3.426E+00	C	3.355E+00	B	47.9	C	50.3	A	2.3945E+10	0.000
	Continua		35.00	-4.701E+00	C	3.080E-01	C	-80.6	C	39.6	C		
3	1.077E+03	0.40	35.00	7.322E-02	C	3.080E-01	C	-80.6	C	224.0	C	2.9859E+07	0.017

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 31. Estructura pavimento alternativa 3, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 32. Modelación alternativa 3, S4

ALTERNATIVA 3 - S4

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

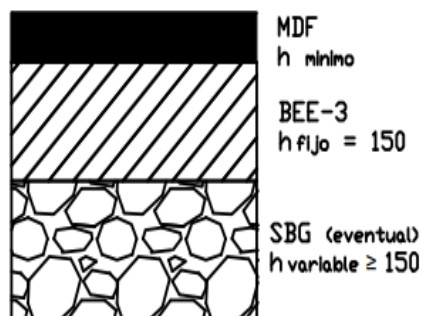
Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión				
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado		
1	24607.43	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9279E-07	3.2910	?	500000	<input type="checkbox"/>			
2	3246.87	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?
3	1592.54	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?
4	1076.82	0.4	?	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4										Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño				
1	2.461E+04	0.35	0.00	1.448E+01	5.598E+00	327.0	B		-161.0	B					
	Continua		7.50	-7.831E+00	2.835E+00	-265.0	B	1.7284E+05	332.0	A					
2	3.247E+03	0.35	7.50	2.937E-01	2.835E+00	-265.0	B		794.0	A	1.0343E+05				
	Continua		22.50	-8.035E-01	9.371E-01	-306.0	C		428.0	B					
3	1.593E+03	0.35	22.50	-1.397E-01	9.371E-01	-306.0	C		615.0	B	3.2459E+05				
	Continua		37.50	-2.345E-01	5.425E-01	-233.0	C		425.0	C					
4	1.077E+03	0.40	37.50	-2.070E-02	5.425E-01	-233.0	C		499.0	C	8.2744E+05				

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 33. Estructura pavimento alternativa 4, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 34. Modelación alternativa 4, S4

ALTERNATIVA 4 - S4

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	24607.43	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9279E-07	3.2910	500000	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
2	35190	0.2	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
3	1592.55	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
4	1076.82	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000

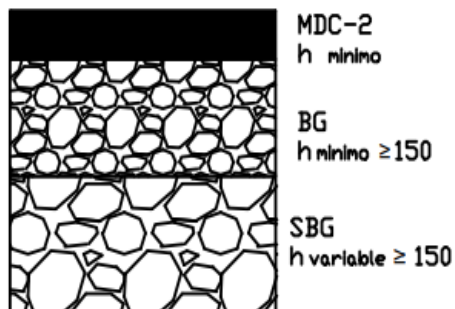
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: ☒ 4

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión	
				Épsilon T (microstrain)	N admisible	Épsilon Z (microstrain)	N admisible
1	2.461E+04	0.35	0.00	7.597E+00	5.598E+00	133.0	-99.5
	Continua		7.50	3.069E+00	4.385E+00	32.1	-31.0
2	3.519E+04	0.20	7.50	1.958E+00	4.385E+00	32.1	-4.8
	Continua		22.50	-4.986E+00	4.803E-01	-127.0	63.0
3	1.593E+03	0.35	22.50	-1.734E-02	4.803E-01	-127.0	297.0
	Continua		37.50	-8.729E-02	3.202E-01	-112.0	233.0
4	1.077E+03	0.40	37.50	2.427E-02	3.202E-01	-112.0	272.0

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 35. Estructura pavimento alternativa 5, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 36. Modelación alternativa 5, S4

ALTERNATIVA 5 - S4

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

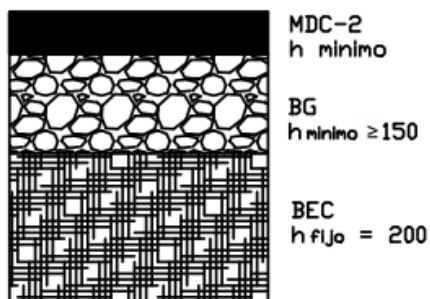
Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	28122.78	0.35	¿E?	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9279E-07	3.2910	?	500000	<input type="checkbox"/>				
2	3246.87	0.35	¿E?	15	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1592.55	0.35	¿E?	15	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	1076.82	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4										Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)		Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.540E+01	5.598E+00	A	309.0	B		-161.0	B				
	Continua		7.50	-8.861E+00	2.712E+00	B	-256.0	B	1.9366E+05	2.582	310.0	A			
2	3.247E+03	0.35	7.50	2.692E-01	2.712E+00	B	-256.0	B		760.0	B	1.2581E+05	3.974		
	Continua		22.50	-7.903E-01	9.126E-01	B	-299.0	C		418.0	B				
3	1.593E+03	0.35	22.50	-1.377E-01	9.126E-01	B	-299.0	C		600.0	B	3.6253E+05	1.379		
	Continua		37.50	-2.305E-01	5.333E-01	C	-229.0	C		419.0	C				
4	1.077E+03	0.40	37.50	-2.060E-02	5.333E-01	C	-229.0	C		492.0	C	8.8146E+05	0.567		

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 37. Estructura pavimento alternativa 6, categoría S4



Fuente: INVIAS

Anexo 38. Modelación alternativa 6, S4

ALTERNATIVA 6 - S4

Archivo:

Número de capas: ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	28122.78	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.6124E-07	3.2910	500000	<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
2	3356.35	0.35	15	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
3	50000	0.2	20	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000
4	1076.82	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4										Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño				
1	2.812E+04	0.35	0.00	1.183E+01	5.598E+00	215.0	B		-84.3	B					
	Continua		7.50	-6.802E+00	3.080E+00	-200.0	B	3.8936E+05	278.0	A					
2	3.356E+03	0.35	7.50	6.883E-01	3.080E+00	-200.0	B		776.0	A	1.1461E+05				
	Continua		22.50	9.432E-01	1.530E+00	26.6	C		261.0	B					
3	5.000E+04	0.20	22.50	2.019E+00	1.530E+00	26.6	C		19.6	A	1.6282E+12				
	Continua		42.50	-3.518E+00	2.243E-01	-59.3	C		30.4	C					
4	1.077E+03	0.40	42.50	4.976E-02	2.243E-01	-59.3	C		168.0	C	1.0825E+08				

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 39. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S1

ALTERNATIVA 5 - S1

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	ν	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión					
					C*k1*(1/E)*k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado			
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	✓	2.3185E-07	3.2910	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	6118.3	0.35	¿E?	15	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1509.57	0.35	¿E?	15	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	503.19	0.4	¿E?	25	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
5	362.86	0.4	¿E?		✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5

No.	E (kgf/cm²)	ν	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.540E+01	5.598E+00	267.0			-143.0		
	Continua		7.50	-5.741E+00	3.029E+00	-158.0	7.5063E+05	0.666	216.0		
2	6.118E+03	0.35	7.50	-2.182E-04	3.029E+00	-158.0			462.0	1.1682E+06	0.428
	Continua		22.50	-2.243E+00	6.302E-01	-310.0			328.0		
3	1.509E+03	0.35	22.50	-3.080E-01	6.302E-01	-310.0			524.0	6.6479E+05	0.752
	Continua		37.50	-5.272E-01	2.988E-01	-315.0			423.0		
4	5.027E+02	0.40	37.50	-4.772E-02	2.988E-01	-315.0			648.0	2.5687E+05	1.947
	Continua		62.50	-5.231E-02	1.581E-01	-193.0			392.0		
5	3.630E+02	0.40	62.50	-8.300E-03	1.581E-01	-193.0			449.0	1.3275E+06	0.377

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 40. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S1

ALTERNATIVA 5 - S1

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	ν	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C ^k k1 ^{1/3} (1/E) ^{k2} /k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	32341.2	0.35	10.5	✓	2.3185E-07	3.2910	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	500000
2	6118.3	0.35	30	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
3	1509.57	0.35	30	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
4	503.19	0.4	25	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000
5	362.86	0.4		✓				✓	1.3650E-09	4.4770	500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5

No.	E (kgf/cm²)	ν	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.081E+01	5.598E+00	170.0			-90.7		
	Continua		10.50	-4.507E+00	2.335E+00	-126.0	1.5808E+06	0.316	167.0		
2	6.118E+03	0.35	10.50	1.652E-01	2.335E+00	-126.0			353.0	3.8971E+06	0.128
	Continua		40.50	-1.003E+00	3.120E-01	-132.0			158.0		
3	1.509E+03	0.35	40.50	-1.203E-01	3.120E-01	-132.0			255.0	1.6713E+07	0.030
	Continua		70.50	-1.958E-01	1.030E-01	-110.0			156.0		
4	5.027E+02	0.40	70.50	-2.192E-02	1.030E-01	-110.0			236.0	2.3638E+07	0.021
	Continua		95.50	-2.356E-02	6.516E-02	-81.0			166.0		
5	3.630E+02	0.40	95.50	-4.874E-03	6.516E-02	-81.0			189.0	6.3887E+07	0.008

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 41. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S2

ALTERNATIVA 5 - S2

Número de capas

☐ 2
☐ 3
☒ 4
☐ 5
☐ 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					$C^*k_1*(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.3185E-07	3.2910	?	500000	<input type="checkbox"/>				
2	6118.3	0.35	¿E?	15	<input type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	1308.66	0.35	¿E?	15	<input type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	436.22	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas:

4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)			Compresión				
				T (kgf/cm²)	Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.550E+01	B	5.598E+00	A	270.0	B				
	Continua		7.50	-5.904E+00	B	3.008E+00	B	-161.0	B	7.0557E+05	0.709	217.0	A
2	6.118E+03	0.35	7.50	-4.069E-02	C	3.008E+00	B	-161.0	B			462.0	A
	Continua		22.50	-2.407E+00	C	6.027E-01	B	-329.0	C			341.0	B
3	1.308E+03	0.35	22.50	-2.692E-01	C	6.027E-01	B	-329.0	C			566.0	B
	Continua		37.50	-4.558E-01	C	3.049E-01	C	-328.0	C			457.0	C
4	4.364E+02	0.40	37.50	-1.886E-02	C	3.049E-01	C	-328.0	C			713.0	C
												1.6744E+05	2.986

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 42. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S2

ALTERNATIVA 5 - S2

Numero de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	ν	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					$C^*k_1^*(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	32341.2	0.35	¿E?	11	✓	2.3185E-07	3.2910	?	500000		
2	6118.3	0.35	¿E?	28	✓					✓	1.3650E-09 4.4770 ? 500000
3	1308.66	0.35	¿E?	30	✓					✓	1.3650E-09 4.4770 ? 500000
4	436.22	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09 4.4770 ? 500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	ν	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión			
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.081E+01	B	5.598E+00	A	168.0	B	-94.5	C	
	Continua		11.00	-4.579E+00	B	2.192E+00	B	-126.0	B	162.0	A	
2	6.118E+03	0.35	11.00	9.188E-02	B	2.192E+00	B	-126.0	B	338.0	B	4.7334E+06 0.106
	Continua		39.00	-1.111E+00	C	3.100E-01	C	-145.0	C	169.0	C	
3	1.308E+03	0.35	39.00	-1.071E-01	C	3.100E-01	C	-145.0	C	285.0	C	1.0158E+07 0.049
	Continua		69.00	-1.703E-01	C	1.122E-01	C	-117.0	C	174.0	C	
4	4.364E+02	0.40	69.00	-8.311E-03	C	1.122E-01	C	-117.0	C	269.0	C	1.3156E+07 0.038

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 43. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S3

ALTERNATIVA 5 - S3

Numero de capas
☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	✓	2.3185E-07	3.2910	?	500000	✓				
2	6118.3	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	2039.31	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	679.77	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4										Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño				
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.417E+01	5.598E+00	242.0			-118.0						
	Continúa		7.50	-5.557E+00	3.080E+00	-155.0	7.9951E+05	0.625	214.0						
2	6.118E+03	0.35	7.50	2.927E-01	3.080E+00	-155.0			465.0	1.1349E+06	0.441				
	Continúa		22.50	-1.672E+00	7.454E-01	-251.0			287.0						
3	2.039E+03	0.35	22.50	-3.018E-01	7.454E-01	-251.0			439.0	1.4683E+06	0.341				
	Continúa		37.50	-5.466E-01	3.620E-01	-253.0			348.0						
4	6.802E+02	0.40	37.50	-2.417E-02	3.620E-01	-253.0			543.0	5.6681E+05	0.882				

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 44. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S3

ALTERNATIVA 5 - S3

Archivo:

numero de capas: ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	32341.2	0.35	¿E?	10.5	✓	2.3185E-07	3.2910	?	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	6118.3	0.35	¿E?	30	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	2039.31	0.35	¿E?	30	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	679.77	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas:

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma		Tracción (fatiga)			Compresión				
				T (kgf/cm ²)	Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño		
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.040E+01	B	5.598E+00	A	160.0	B		-80.2	C	
	Continua		10.50	-4.528E+00	B	2.356E+00	B	-126.0	B	1.5808E+06	0.316	167.0	A
2	6.118E+03	0.35	10.50	1.703E-01	B	2.356E+00	B	-126.0	B			355.0	B
	Continua		40.50	-7.566E-01	C	3.763E-01	C	-109.0	C			141.0	C
3	2.039E+03	0.35	40.50	-1.173E-01	C	3.763E-01	C	-109.0	C			218.0	C
	Continua		70.50	-1.988E-01	C	1.305E-01	C	-87.9	C			130.0	C
4	6.802E+02	0.40	70.50	-1.017E-02	C	1.305E-01	C	-87.9	C			201.0	C
												4.8498E+07	0.010

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 45. Modelación propuesta 1, alternativa 5, S4

ALTERNATIVA 5 - S4										Número de capas <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6		
Archivo: <input type="text"/>												
Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento												
Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión				
					$C^*k_1^*(1/E)^{k_3}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado		
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.3185E-07	3.2910	<input type="checkbox"/>	500000	<input type="checkbox"/>		
2	6118.3	0.35	¿E?	15	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
3	2039.31	0.35	¿E?	15	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
4	1076.82	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.												
Número de capas: 4						Tracción (fatiga)				Compresión		
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.346E+01	5.598E+00	227.0			-104.0			
	Continua		7.50	-5.568E+00	3.100E+00	-155.0	7.9951E+05	0.625	215.0			
2	6.118E+03	0.35	7.50	3.008E-01	3.100E+00	-155.0			467.0	1.1133E+06	0.449	
	Continua		22.50	-1.448E+00	8.199E-01	-232.0			276.0			
3	2.039E+03	0.35	22.50	-1.978E-01	8.199E-01	-232.0			443.0	1.4099E+06	0.355	
	Continua		37.50	-3.273E-01	4.487E-01	-195.0			318.0			
4	1.077E+03	0.40	37.50	-2.386E-02	4.487E-01	-195.0			418.0	1.8286E+06	0.273	

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 46. Modelación propuesta 2, alternativa 5, S4

ALTERNATIVA 5 - S4

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión					
					C*k1*[1/E]^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado			
1	32341.2	0.35	¿E?	10.5	✓	2.3185E-07	3.2910	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	6118.3	0.35	¿E?	30	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	3230.46	0.35	¿E?	30	✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	1076.82	0.4	¿E?		✓				✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	9.881E+00	5.598E+00	150.0			-69.3		
	Continua		10.50	-4.497E+00	2.376E+00	-126.0	1.5808E+06	0.316	168.0		
2	6.118E+03	0.35	10.50	1.886E-01	2.376E+00	-126.0			358.0	3.6593E+06	0.137
	Continua		40.50	-4.477E-01	4.660E-01	-79.8			122.0		
3	3.230E+03	0.35	40.50	-1.173E-01	4.660E-01	-79.8			164.0	1.2058E+08	0.004
	Continua		70.50	-2.345E-01	1.560E-01	-66.0			97.4		
4	1.077E+03	0.40	70.50	-1.081E-02	1.560E-01	-66.0			151.0	1.7452E+08	0.003

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 47. Modelación propuesta alternativa 6, S1

ALTERNATIVA 6 - S1

Numero de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	✓	2.3185E-07	3.2910	?	500000	✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
2	6118.3	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	50000	0.2	¿E?	20	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	503.19	0.4	¿E?	25	✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000
5	362.86	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.091E+01	5.598E+00	166.0	B		-56.5	B	
	Continua		7.50	-4.140E+00	3.457E+00	-120.0	A	1.8562E+06	0.269	196.0	A
2	6.118E+03	0.35	7.50	8.402E-01	3.457E+00	-120.0	A		481.0	A	9.7537E+05
	Continua		22.50	9.657E-01	1.489E+00	19.7	C		139.0	A	
3	5.000E+04	0.20	22.50	1.591E+00	1.489E+00	19.7	C		21.9	A	9.9075E+11
	Continua		42.50	-3.956E+00	1.061E-01	-65.9	C		31.6	C	
4	5.027E+02	0.40	42.50	1.825E-02	1.061E-01	-65.9	C		177.0	C	8.5695E+07
	Continua		67.50	-2.763E-03	7.046E-02	-60.7	C		143.0	C	
5	3.630E+02	0.40	67.50	1.111E-02	7.046E-02	-60.7	C		168.0	C	1.0825E+08

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 48. Modelación propuesta alternativa 6, S2

ALTERNATIVA 6 - S2										Número de capas 2 3 4 5 6		
Archivo: <input type="text"/>												
Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento												
Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión				
					C*k1*[1/E]^k3	k2	N esperado		k4	k5	N esperado	
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	✓	2.3185E-07	3.2910	?	500000	✓		
2	6118.3	0.35	¿E?	15	✓					✓	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
3	50000	0.2	¿E?	20	✓					✓	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
4	436.22	0.4	¿E?		✓					✓	1.3650E-09	4.4770 ? 500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.												
Número de capas: 4						Tracción (fatiga)			Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño	
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.081E+01	B 5.598E+00	164.0	B		-54.9	B		
	Continua		7.50	-4.160E+00	A 3.457E+00	-121.0	A	1.8062E+06 0.277	197.0	A		
2	6.118E+03	0.35	7.50	8.300E-01	B 3.457E+00	-121.0	A		482.0	A	9.6634E+05 0.517	
	Continua		22.50	9.636E-01	B 1.499E+00	19.4	C		139.0	A		
3	5.000E+04	0.20	22.50	1.570E+00	C 1.499E+00	19.4	C		22.0	A	9.7075E+11 0.000	
	Continua		42.50	-3.906E+00	C 1.091E-01	-65.1	C		31.2	C		
4	4.364E+02	0.40	42.50	2.784E-02	C 1.091E-01	-65.1	C		194.0	C	5.6839E+07 0.009	

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 49. Modelación propuesta alternativa 6, S3

ALTERNATIVA 6 - S3

Numero de capas
☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado	
1	32341.2	0.35	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.3185E-07	3.2910	?	500000	<input type="checkbox"/>		
2	6118.3	0.35	15	<input type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
3	50000	0.2	20	<input type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000
4	679.7	0.4		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770 ? 500000

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: **4**

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tracción (fatiga)			Compresión		
						Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.050E+01	5.598E+00	A	159.0	B	-48.8	B	
	Continua		7.50	-4.252E+00	3.457E+00	B	-123.0	A	17113E+06	0.292	199.0 A
2	6.118E+03	0.35	7.50	7.984E-01	3.457E+00	B	-123.0	A	484.0	A	9.4859E+05 0.527
	Continua		22.50	9.575E-01	1.509E+00	B	17.8	C	141.0	A	
3	5.000E+04	0.20	22.50	1.468E+00	1.509E+00	B	17.8	C	22.6	A	8.6058E+11 0.000
	Continua		42.50	-3.569E+00	1.458E-01	C	-59.8	C	29.4	C	
4	6.802E+02	0.40	42.50	3.355E-02	1.458E-01	C	-59.8	C	171.0	C	1.0000E+08 0.005

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

Anexo 50. Modelación propuesta alternativa 6, S4

ALTERNATIVA 6 - S4

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo:

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión						
					C*k1*(1/E)^k3	k2	N esperado	k4	k5	N esperado				
1	32341.2	0.35	¿E?	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.3185E-07	3.2910	?	500000	<input type="checkbox"/>				
2	6118.3	0.35	¿E?	15	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
3	50000	0.2	¿E?	20	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000
4	1076.82	0.4	¿E?		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	1.3650E-09	4.4770	?	500000

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 4		Tracción (fatiga)						Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.234E+04	0.35	0.00	1.020E+01	B	5.598E+00	A	153.0	B	-42.5	B
	Continua		7.50	-4.344E+00	A	3.457E+00	B	-125.0	A	201.0	A
2	6.118E+03	0.35	7.50	7.689E-01	B	3.457E+00	B	-125.0	A	486.0	A
	Continua		22.50	9.524E-01	B	1.530E+00	B	15.8	C	144.0	A
3	5.000E+04	0.20	22.50	1.356E+00	C	1.530E+00	B	15.8	C	23.3	A
	Continua		42.50	-3.202E+00	C	1.958E-01	C	-54.0	C	27.5	C
4	1.077E+03	0.40	42.50	3.967E-02	C	1.958E-01	C	-54.0	C	149.0	C
										1.8526E+08	0.003

Fuente: Autoría propia adaptado de WinDepav 2.6

14.BIBLIOGRAFÍA

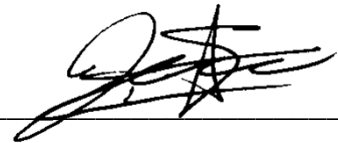
- **Acosta Ariza, Manuela Alejandra y Alarcón Romero , Pedro Alejandro . 2017.** ANÁLISIS DE LA CANTIDAD Y EL ESTADO DE LAS VÍAS TERCARIAS EN COLOMBIA Y LA OPORTUNIDAD DE LA INGENIERIA CIVIL PARA SU CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO. Universidad Catolica de Colombia. Bogotá : s.n., 2017.
- **Aplicada, Geotecnia. 2020.** Metodo racional para diseño de pavimentos flexibles. Cartagena de indias : s.n., 2020.
- **Calderon, Erasco Esneider Hernandez y Culma Ramirez, Juan Carlos. 2019.** DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA VIA DEL BARRIO EL MIRADOR EN EL. Ibagué - Tolima : s.n., 2019.
- **Corredor, Gustavo. 2008.** Maestría en vías terrestres - Módulo III - Diseño de pavimentos I. s.l. : Seccion para delegados de la camara de construccion, 2008.
- **Dalla Paola, Nick Thom. 2016.** Realiability in pavement design. University of Nottingham, Digital Object Identifier.2016.
- **Damien Bateman. 2018.** Pavement Design: Future challenges and opportunities, The future of transport. 2018.
- **Federación de enseñanza de. 2011** TIPOS DE ESFUERZOS FISICOS. P 15, Andalucía : Revista digital para profesionales de la enseñanza, 2011.
- **Gil, Juan Esteban y Higueroa, Édgar. 2019.** Del total de la red vial terciaria con la que cuenta Colombia, 96% está en mal estado. La República. 2019.
- **Gonzales, Antonio Perez. 2018.** Mecapedia - Enciclopedia virtual de Ingeniería Mecanica. [En línea] Dpto. Ingeniería Mecanica y Construcción, 09 de Marzo de 2018. [Citado el: 18 de Febrero de 2021.] http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm.
- **González, Ricardo Sánchez. 2003.** CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS. Universidad de los ANDES . Bogotá : s.n., 2003.
- **Gonçalves y Ceratti, 2009.** Study of permanente deformations in asphalt concrete layers, University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil.
- **Higueroa Sandoval, Carlos Hernando. 2008.** Diseño de estructuras de pavimentos en afirmado. s.l. : Faculta de Ingenieria UPTC, 2008.
- **H. Huang Yang. 2004.** Pavement Analysis and Design. University of Kentucky.

- **Josue Hernandez, Karla Rosales y Wilfredo Trigueros. 2016.** METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO . San salvador : Universidad de el salvador, 2016.
- **Lizcano, Fredy Alberto Reyes. 2003.** DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS. Bogotá : Centro editorial Javeriano, 2003.
- **Madrid, Universidad Carlos III de. 2013.** Uc3m. [En línea] 2013. https://uc3m.libguides.com/guias_tematicas/citas_bibliograficas/une-iso-690.
- **Maria Zambrano y Eduardo Tejeda. 2019.** Materiales granulares tratados con emulsion asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles., 3, Ecuador : Revista Arquitectura e Ingeniería, 2019, Vol. 13.
- **Medina Ramírez, Víctor Hugo. 2003.** Aplicaciones de las emulsiones asfálticas y los asfaltos diluidos en mezclas asfálticas en frío utilizando agregados del río Aguaytía - Ucayali. s.l. : Universidad Nacional de Ingeniería, 2003.
- **Montejo Fonseca, Alfonso.** Ingeniería de pavimentos.
- **Monzalve, Lina. 2012.** DISEÑO DE PAVIMENTE FLEXIBLE Y RIGIDO. Universidad del Quindío, ingeniería.
- **Quintero Castiblanco , Carlos Eduardo y Bolívar Palomino, Simón Andrés. 2019.** ANÁLISIS DEL ESTADO DE LAS VÍAS SECUNDARIAS EN COLOMBIA Y LA OPORTUNIDAD DE LA INGENIERÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO. Universidad Catolica de Colombia . Bogotá : s.n., 2019.
- **Rondon, Hugo Alexander y Reyes, Fredy. 2009.** DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MATERIALES GRANULARES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: ESTADO DEL CONOCIMIENTO. Medellin : Universidad de Medellin, 07 de 05 de 2009.
- **Rondon, Hugo Alexander y Reyes, Fredy. 2015.** PAVIMENTOS, Materiales, construccion y diseño. Bogotá, 2015.
- **Rondón Quintana , Hugo Alexander y Reyes Lizcano , Fredy Alberto . 2011.** PAVIMENTOS Materiales, construcción y diseño. Bogotá : ECO ediciones, 2011.
- **Sandoval, Higueroa. 2010.** Diseño de estructras de pavimentos en afirmado.. 24, s.l. : Revista Facultad de Ingeniería, 2010, Vol. 17.
- **Sánchez, Ana María. 2020.** Mintransporte informó que ya se firmaron 183 convenios de obra y empezarán en noviembre, los otros 755 se harán en el primer semestre de 2021. La Repúblca. 27 de octubre de 2020.

- **Sánchez, Fernando. 2016.** Materiales para Base y subbase
- **Varela, Luis Ricardo Vasquez. 2018.** WinDEPAV 2.6. [En línea] igepav, 2018.
- **Zuñiga, Rosa. 2015.** LABORATORIO NACIONAL DE VIABILIDAD - Mezcla asfáltica en caliente. Ministerio de obras públicas. 2015



Firma Estudiante 1
Daniel Fernando Herrera Cabrejo
Código 506954



Firma Estudiante 2
Juan David Méndez Sánchez
Código 507080



Firma Asesor del Trabajo de Grado
Cristhian Alexander Rosales Rodríguez